INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2023 · nº 556 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COLAPSO GLACIAR

La rápida fusión del hielo antártico está acelerando el derrumbe de los glaciares

NEUROCIENCIA

La consciencia durante el coma

ASTRONOMÍA

Origen de las explosiones rápidas de radio

BIOLOGÍA

El cáncer contagioso de las almejas

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

ILUSTRACIÓN DE PORTADA: MARK ROSS

APUNTES



Se están investigando las comunidades bacterianas de los animales escasos, como el kakapó.

STEPHEN BELCHER/MINDEN PICTURES

ECOLOGÍA

EL MICROBIOMA DE LA FAUNA SILVESTRE

La comunidad microbiana intestinal de los animales escasos alberga secretos de su supervivencia

El kakapó es un loro gravemente amenazado de Nueva Zelanda, el más pesado del mundo, incapaz de volar y de hábitos nocturnos. De plumaje fragante y verde musgoso y un extraño semblante con «mostachos», tiene una esperanza de vida confirmada de hasta 90 años. A toda esa lista de peculiaridades se suma ahora su microbioma intestinal, compuesto casi por completo por bacterias *Escherichia coli*. A semejanza del ser humano, el tubo digestivo, la piel y otras partes del cuerpo de los animales albergan billones de bacterias, virus, arqueas y hongos: un ecosistema interno que ayuda a extraer los nutrientes de los alimentos, a combatir los microbios patógenos y a potenciar el sistema inmunitario.

Ahora, a medida que la secuenciación genética se abarata y gana en refinamiento, los científicos están examinando los singulares microbiomas de algunas especies animales amenazadas en busca de pistas que ayuden a evitar su extinción.

Tales investigaciones han revelado que el kakapó es tan extraño por dentro como por fuera, afirma Annie West, ecóloga microbiana de la Universidad de Auckland: «Su microbioma es bastante raro, como casi todo en él». Quedan unos 250 kakapós que viven en cinco islas remotas, a salvo de los depredadores y bajo la atenta supervisión de los funcionarios de fauna neozelandeses.

En 2019, funcionarios del Gobierno y voluntarios recogieron deposiciones recientes y material de nidos de 67 polluelos y enviaron las muestras a West para que analizara el ADN.

E. coli es ubicua en el aparato digestivo humano, pero solo representa un pequeño porcentaje de las bacterias que habitan en nosotros. Investigaciones precedentes habían revelado que esta bacteria domina en el intestino del kakapó adulto, si bien los porcentajes varían notablemente de un individuo a otro, llegando en ciertos casos a constituir hasta el 99 por ciento del microbioma. En un nuevo estudio publicado en *Animal Microbiome*, West y sus colaboradores describen que, al poco de nacer, *E. coli* ya forma el grueso de la comunidad microbiana intestinal, predominancia esta que no hace sino aumentar a medida que crece el pollo.

«Es muy raro. Si se diera en una persona, sería preocupante», comenta West. No se sabe si eso es perjudicial para el kakapó, pero un microbioma tan homogéneo despierta preocupación porque podría no estar desempeñando todas las funciones que un animal precisa. «Si el microbioma pierde diversidad, posiblemente pierda cierta funcionalidad», añade West. También se ha comprobado que, cuando se alimenta a sus pollos con suplementos específicos para ellos, comienza a predominar otra bacteria.

El microbioma simplificado se explica en parte por la extrema escasez de este loro áptero. En otros estudios se ha visto que, cuando las poblaciones animales disminuyen o quedan fragmentadas, algunos de los microbios que albergan también se pierden, explica Lifeng Zhu, ecólogo de la Universidad Normal de Nankín que no ha participado en el nuevo trabajo. «Es necesario conservar la diversidad microbiana del cuerpo de los animales tanto como la de los ecosistemas y las especies», afirma. Zhu explica que el cambio climático, la degradación del hábitat, el contacto con los seres humanos y la permanencia en cautividad pueden alterar drásticamente el microbioma animal, y cuando comenzamos a intervenir con el propósito de salvar las especies amenazadas, podemos ejercer efectos indeseados en los mundos en miniatura de su interior.

Las investigaciones del propio Zhu han demostrado que los pandas gigantes mantenidos en los centros de cría albergan microbios por completo distintos a sus iguales en libertad, sobre todo porque consumen alimentos diferentes. Cuando un panda criado en cautividad se deja en libertad, su microbioma experimenta una transformación a lo largo de un año, durante el cual corre más riesgo de enfermar. «Nos hemos

dado cuenta de que los pandas no solo necesitan adquirir un comportamiento salvaje, sino un microbioma intestinal que también lo sea», afirma Zhu.

Los biólogos andan catalogando todavía los microbios que habitan en el cuerpo de las especies más amenazadas y los cambios que esas comunidades microbianas experimentan con el tiempo, explica la bióloga marina de la Universidad Flinders, Elizabeth Dinsdale, que bucea con tiburones para obtener muestras de los microbios de su piel. Cerca del 90 por ciento de los que ha descubierto eran desconocidos para la ciencia, y su equipo ha reconocido la existencia de distintas poblaciones del tiburón ballena en virtud de su microbioma cutáneo.

La siguiente pregunta crucial es qué hacen exactamente todos esos microorganismos en el hospedador. La secuenciación del genoma aportará pistas al revelar los genes que fabrican las proteínas con que se digiere la fibra vegetal, se tolera la salinidad o se neutralizan los metales pesados. El cultivo de las colonias microbianas en el laboratorio, que ayuda a confirmar el cometido de los microorganismos, es lento, caro y difícil de llevar a cabo en muchos microbios. Pero los incipientes avances en robótica prometen acelerar el proceso y permitirán observar el modo en que cada microbio actúa en concierto con los demás.

Algunos investigadores ya están experimentando con la ingeniería microbiómica. Por ejemplo, las comunidades microbianas mucosas de los corales son sensibles a la temperatura y la contaminación; las aguas marinas excesivamente cálidas hacen que expulsen las microalgas simbióticas de las que dependen, lo que causa el blanqueamiento. Dinsdale explica que en Australia se está estudiando si es posible crear corales resistentes al cambio climático por medio de «una especie de elixir microbiano» a base de bacterias que están más habituadas a las oscilaciones de la temperatura. Otros ecólogos de ese país han demostrado que se puede modificar el microbioma del koala con el trasplante de heces, de modo que este marsupial emblemático sea capaz de digerir otras especies de eucalipto.

En Estados Unidos, el laboratorio de Valerie J. McKenzie en la Universidad de Colorado en Boulder está usando probióticos para intentar salvar los sapos boreales de la quitridiomicosis, una enfermedad causada por hongos. Los anfibios albergan un microbioma rico en su piel recubierta de moco, que es donde ataca el devastador hongo *Batrachochytrium dendrobatidis*. El equipo de McKenzie ha descubierto una bacteria dotada de una potente acción fungicida que se encuentra de forma natural tanto en el hábitat de las Montañas Rocosas donde habitan los sapos amenazados como en su propia piel. El grupo ha demostrado en el laboratorio que cuando se inocula este microbio probiótico a los sapos, aumenta un 40 por ciento su probabilidad de supervivencia a la infección fúngica.

Como paso siguiente, McKenzie y su equipo capturaron sapos jóvenes y los depositaron en «balnearios» hechos a la medida, donde se bañaban durante 24 horas con el probiótico antes de devolverlos a su medio. Para que el tratamiento funcione «hay que aplicarlo en el momento oportuno del desarrollo», aclara la experta. Los sapos tratados que se volvieron a capturar estaban menos enfermos que los individuos del grupo de control sin tratar.

West espera que su investigación sobre el microbioma conduzca algún día a tratamientos parecidos para el kakapó. Por lo menos, opina que ahora que sabemos cuál es la composición normal de su microbiota intestinal, el análisis periódico de las deposiciones servirá como indicador precoz de alteración a los responsables de su conservación. «La idea es que, en lugar de tomar muestras directas de los kakapós, con el estrés que ello provoca, el perfil del microbioma permita saber si están enfermos, aunque no se aprecien síntomas externos. Este conocimiento tendría grandes implicaciones en los programas de conservación.»

Kate Evans

MEDICINA

OLER EL PÁRKINSON

Un sentido del olfato extraordinario inspira una prueba cutánea que detectaría esta enfermedad

Joy Milne acaparó en 2015 numerosos titulares por poseer un talento fuera de lo común: era capaz de reconocer con el olfato a las personas aquejadas de párkinson, una enfermedad neurodegenerativa que se calcula que afecta a casi un millón de personas solo en EE.UU. [160.000 en España]. Desde entonces un grupo de investigación del Reino Unido ha estado trabajando con esta mujer escocesa con objeto de averiguar qué moléculas concretas son las responsables del rastro oloroso que deja la enfermedad. El equipo ha acotado la búsqueda hasta un conjunto específico de la dolencia y ha creado una sencilla prueba con un hisopo cutáneo que las detecta.

Enfermera jubilada de Perth, de 72 años, Milne tiene hiperosmia hereditaria, un trastorno que le otorga un olfato hipersensible. Descubrió su facultad cuando se percató de que su marido, Les, desprendía un nuevo aroma a almizcle, pero no achacó aquel cambio de olor corporal al párkinson hasta que no se lo diagnosticaron muchos años más tarde. Su esposo falleció en 2015.

Milne conoció al neurocientífico de la Universidad de Edimburgo Tilo Kunath en un evento organizado en 2012 por Parkinson's UK, organización benéfica dedicada a la investigación. Escéptico al principio, Kunath y su equipo la sometieron a pruebas. Tuvo que oler una docena de camisetas: la mitad pertenecían a personas con párkinson y la otra mitad a personas sanas. Reconoció sin error la enfermedad en los seis casos y señaló una de las otras seis a cuyo propietario le acabarían diagnosticando la enfermedad en menos de un año.

En colaboración con el equipo de Perdita Barran, química de la Universidad de Mánchester, Kunath recurrió a la espectrometría de masas para examinar el sebo cutáneo (secreción grasa que recubre la piel) de las personas diagnosticadas con párkinson. De ese modo descubrieron cambios en la composición molecular que indicaban alteraciones en el metabolismo de los lípidos.

En el último estudio de Barran, publicado en la revista *JACS Au* de la Asociación Americana de Química, ella y sus colaboradores explican el desarrollo de una sencilla prueba con un hisopo que permite detectar las moléculas distintivas del párkinson. Al comparar muestras de sebo de 79 personas con las de otras 71 personas sanas, el equipo pudo acotar un conjunto de lípidos grandes. Estos compuestos se detectan en pocos minutos con un tipo especial de espectrometría de masas donde se emplea un pedazo de papel para transferir con rapidez al analizador las sustancias del hisopo con el que se ha tomado la muestra.

«Creo que es un conjunto de biomarcadores con grandes posibilidades», opina Blaine Roberts, bioquímico de la Universidad Emory, que no ha participado en la investigación. Matiza que una de las grandes preguntas sin responder es la forma exacta que tendrá la prueba. Los autores del nuevo estudio describen en detalle el perfil químico singular del párkinson, pero no han indicado ninguna evaluación sobre su exactitud. Según Barran, ciertos datos no publicados todavía indican que la exactitud de su prueba superaría

THOMAS FUCHS

el 90 por ciento a la hora de determinar si una persona padece la enfermedad o no.

Tiago Outeiro, neurocientífico en la Universidad de Gotinga, ajeno a la investigación, califica de novedosa la prueba cutánea basada en el sebo. Afirma que una ventaja indiscutible respecto a otros métodos de análisis de los biomarcadores del párkinson es la suma facilidad con que se tomaría la muestra.

Outeiro se pregunta si las personas aquejadas por otras enfermedades que guardan síntomas y patologías en común con los del párkinson, como la atrofia multisistémica, tendrán también marcadores bioquímicos parecidos.

El equipo de investigación trabaja ahora con hospitales locales para averiguar si su prueba con sebo es factible en los laboratorios clínicos, un aspecto determinante para ver si sirve como prueba de diagnóstico. Barran espera que, a la larga, con la prueba se detecten los casos sospechosos de párkinson remitidos al neurólogo por el médico de cabecera, que recibirían así un diagnóstico rápido. En el Reino Unido se cuentan por miles las personas que esperan pasar consulta con un neurólogo del Servicio Nacional de Salud, en una lista de espera que se calcula en dos años, según Barran. Con la nueva prueba, los interesados podrían enviar muestras de sebo por correo a un laboratorio clínico y se sabría quiénes necesitan una atención preferente. El equipo de Barran busca ahora, entre las personas de la lista de espera, voluntarios que quieran participar en un ensayo clínico donde serán sometidos a ese cribado.

Ella y sus colaboradores también están cooperando con colegas de la Universidad Harvard a fin de averiguar si las personas con estreñimiento sin causa aparente, pérdida de olfato u otros signos precoces propios del párkinson que no han sido diagnosticadas hasta la fecha presentan biomarcadores en el sebo.

El don de Milne ha desatado la búsqueda de biomarcadores de otras enfermedades a través de su posible rastro oloroso. El año pasado, investigadores chinos publicaron un artículo donde describían una nariz electrónica: un sensor dotado de inteligencia artificial inspirado en el sentido del olfato, capaz de oler una serie de moléculas no lipídicas presentes en el sebo de los pacientes parkinsonianos. Otros grupos de China, Reino Unido y más países también han adiestrado perros para que detecten la enfermedad a través de ese sentido.

Pero la historia no acaba ahí, pues tal vez el párkinson no sea la única enfermedad que Milne es capaz de detectar. También afirmó percibir un olor peculiar en las personas con alzhéimer, cáncer y tuberculosis, por lo que colabora con otros científicos para comprobar si esas enfermedades también dejan un aroma peculiar. Desea que la investigación acabe redundando en favor de los pacientes con esas dolencias.

«Mi esposo supo que tenía párkinson durante 21 años, desde que se lo diagnosticaron, pero en realidad lo sufría desde mucho antes. Me gustaría que nadie sufriera como él», declaró en 2015.

Diana Kwon

COGNICIÓN ANIMAL

A LOS ABEJORROS LES GUSTA JUGAR

Su habilidad para jugar con bolitas de madera plantea preguntas sobre la vida interior de los invertebrados

Un experimento reciente ha demostrado que a los abejorros les gusta «jugar» con diminutas bolas de madera. Es la primera vez que se graba a un insecto que actúa movido por pura diversión.

Cuando los animales adoptan repetidamente un comportamiento que no les proporciona alimento, refugio u otro beneficio inmediato, lo más seguro es que estén jugando. El juego con objetos inanimados es común en los animales, aunque la mayoría de los ejemplos conocidos son de mamíferos y aves, sin que hasta ahora se haya documentado este comportamiento en insectos.

El juego es una pieza del rompecabezas que hay que tener en cuenta a la hora determinar si un grupo de animales es sintiente, es decir, si


RICHARD RICKITT

Un abejorro marcado con una etiqueta interacciona con bolas de distintos colores.

sus miembros tienen sentimientos y experiencias internas. Los científicos consideran que los mamíferos, las aves y, cada vez más, los cefalópodos y los peces son seres sintientes. «Con el tiempo, esto puede decirnos algo más sobre si los insectos también lo son», explica Samadi Galpayage, estudiante de posgrado del grupo de Lars Chittka, en la Universidad Queen Mary de Londres, y autor principal del nuevo estudio sobre abejorros, publicado el pasado octubre en *Animal Behaviour*.

En 2017, Chittka y su equipo enseñaron a los abejorros a hacer rodar bolas a cambio de un premio azucarado. En la nueva investigación, Galpayage, Chittka y su equipo eliminaron la recompensa para determinar si esa actividad era una forma de juego. En primer lugar, crearon un sistema que permitía a los abejorros avanzar por un camino sin obstáculos hacia una zona donde había una solución de sacarosa. A lo largo del camino, los investigadores colocaron pequeñas bolas de madera de distintos colores, algunas fijadas al suelo y otras sueltas. Los abejorros podían acceder a la sacarosa sin necesidad de interactuar con las bolas.

Durante 54 horas, el equipo observó cómo los 45 abejorros del experimento realizaron, en conjunto, 910 rodamientos de las bolas. Algunos volvieron a cogerlas una y otra vez, moviéndolas de distintas formas. El equipo descubrió que jugaban y se alimentaban en diferentes momentos y con una frecuencia también desigual, lo que indicaba que tenían distintas motivaciones para ambas acciones. Quienes más interesados estaban en hacerlas rodar fueron los abejorros más jóvenes y los machos.

En un experimento posterior, entrenaron a los abejorros para que asociaran esa actividad con un determinado color de una cámara. La mayoría eligió entrar en la cámara de ese color incluso cuando estaba vacía.

Según Galpayage, aunque estos resultados demuestran la existencia de un comportamiento lúdico, el estudio no aclara cuál es la motivación subyacente, si es que hay alguna. Para saber si los insectos juegan por placer, por ejemplo, habría que analizar qué neurotransmisores se activan mientras ruedan las bolitas.

Olli Loukola, ecólogo del comportamiento de la Universidad de Oulu, en Finlandia, que dirigió el trabajo sobre el rodamiento de bolas en 2017 pero no participó en el nuevo estudio, también se pregunta por la función última de este comportamiento. El interés por mover objetos podría deberse a una «necesidad innata de desarrollar habilidades motoras», apunta.

Con independencia de cuál sea la función del juego, estas investigaciones pueden ayudar a determinar si una especie es sintiente, afirma Heather Browning, experta en bienestar animal y filósofa de la Universidad de Southampton.

«Todavía desconocemos cuál es la relación entre la sintiencia y los diferentes comportamientos», señala Browning, que tampoco participó en el estudio. Las pruebas sobre la existencia de muchos rasgos, como el comportamiento lúdico, la estructura compleja del cerebro y la capacidad de aprendizaje «aumentan la probabilidad de sintiencia».

Grace van Deelen

SALUD

MICROBIOS EN LOS DIENTES

Las bacterias y los hongos se prestan apoyo para desplazarse juntos por la dentadura y propagar la caries

ZHI REN

Los hongos (*azul*) imprimen a las bacterias (*verde*) un movimiento a saltos.

La mayoría de nosotros no queremos ni pensar en los microbios que nos infestan la boca y nos provocan caries. Recubren los dientes, se alimentan de los mismos azúcares que nosotros y excretan ácidos que degradan y perforan el esmalte dental. Y ahora parece que el panorama es todavía peor.

Un nuevo estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* revela que los conglomerados de hongos y bacterias cooperan para «caminar» y «saltar» por la superficie dental, propagando las caries mucho más rápido que si ambos actuaran por su cuenta.

«Hasta ahora se creía que la causante de la caries era la acumulación progresiva de bacterias», afirma uno de los autores del estudio, Hyun (Michel) Koo, microbiólogo y odontólogo de la Universidad de Pensilvania. Su equipo ha tomado muestras de saliva de niños pequeños afectados por caries grave y ha descubierto asociaciones naturales de la bacteria *Streptococcus mutans* con el hongo *Candida albicans*, que no se encontraban en la saliva de otros niños con dentadura más sana. El examen de esas masas al microscopio reveló algo sorprendente: parecían capaces de ejecutar movimientos complejos.

Las pequeñas células bacterianas tendían a congregarse en torno al centro de cada masa, formando un aglomerante pegajoso que mantiene cohesionado el conjunto. Por su parte, las células del hongo en forma de bastoncillo, más grandes, se concentraban en la parte exterior, como si fueran extremidades que impulsaran la masa hacia adelante a medida que esta crecía. En ocasiones las extremidades delanteras parecían caminar o incluso saltar, con una rápida expansión de la masa, mientras las extremidades traseras permanecían en tierra. Si dos masas se acercaban entre sí, a veces se fusionaban.

Los microorganismos de la cavidad bucal «actúan como una comunidad que intenta ampliar su territorio» para ganar terreno y recursos en forma de azúcares, compara Zhi Ren, posdoctorando del laboratorio de Koo y uno de los autores principales del estudio. El equipo descubrió que esas asociaciones de bacterias y hongos crecen más rápido y son más resistentes a la eliminación, mediante fuerza mecánica o antimicrobianos, que sus dos integrantes por sí solos.

«La verdadera contribución del artículo es el aspecto espaciotemporal del comportamiento de esas masas», opina Judith Behnsen, microbióloga de la Universidad de Illinois, ajena al nuevo trabajo. Añade que la mayoría de los microscopistas examina los microbios suspendidos en una solución conservante, pero en este estudio se los ha observado vivos y coleando: «Cuando vi las imágenes del artículo me quedé estupefacta».

Las investigaciones futuras podrían determinar quién tiene más riesgo de que esas masas de bacterias y hongos aparezcan en su boca y el mejor modo de combatirlas, explica Ren. Añade que la caries dental es muy frecuente en todo el mundo, de modo que el estudio de las interacciones entre las unas y los otros nos ayudará a defendernos mejor contra sus pretensiones territoriales.

Daniel Leonard

TECNOLOGÍA

TORTUGAS ROBÓTICAS

Un robot inspirado en las tortugas es capaz de adaptar sus extremidades al entorno

Un nuevo robot anfibio con forma de tortuga posee la habilidad de explorar esas regiones traicioneras donde la tierra se junta con el mar y podría conducir a la construcción de máquinas capaces de abrirse camino en las complejas condiciones del mundo real.

La Tortuga Robótica Anfibia (ART, por sus siglas en inglés), descrita en un artículo publicado en *Nature*, puede transformar sus extremidades para que simulen las aletas de las tortugas marinas o las patas de las terrestres, aunando así las mejores características de movilidad de ambos animales. «Casi todos los robots anfibios usan sistemas de propulsión específicos para cada entorno», explica Rebecca Kramer-Bottiglio, especialista en robótica de la Universidad Yale y autora principal del artículo. «Nuestro sistema adapta un mecanismo de propulsión unificado para ambos medios: posee cuatro extremidades que pueden alternar entre una aleta para la locomoción acuática y una pata para la terrestre.»

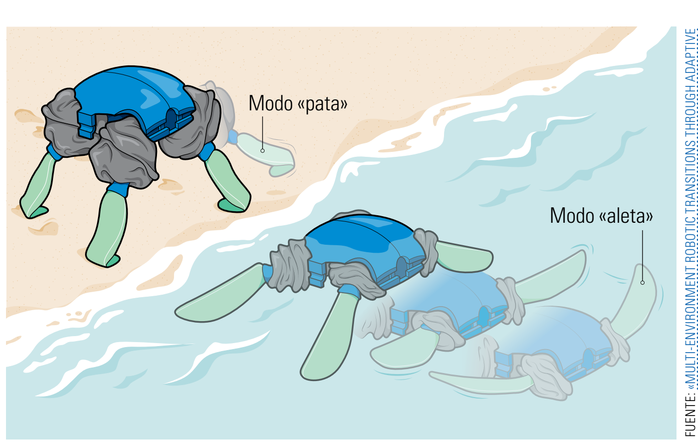
Cada extremidad está rodeada de un material polimérico compuesto que es maleable cuando se calienta y rígido al enfriarse. El cambio de forma se produce gracias a unas resistencias de cobre integradas que calientan y ablandan dicho material exterior; entonces, un «músculo» robótico situado debajo se hincha o deshincha para convertir una aleta plana en una pata redondeada, o viceversa. Por último, el polímero se enfría y se endurece alrededor de la nueva configuración en uno o dos minutos. En los hombros, esas extremidades robóticas blandas se acoplan a articulaciones duras más habituales, las cuales cuentan con tres motores electrónicos para que el robot pueda reptar o arrastrarse por tierra, así como remar o aletear en el agua. Dichas articulaciones se conectan a un chasis modular, donde unos tubos de PVC sellados protegen del agua los componentes electrónicos. Un caparazón impreso en 3D confiere al robot una forma aerodinámica y un espacio que contiene aire o lastre para ajustar la flotabilidad.

La integración de la robótica tradicional y la «blanda» es lo que confiere a ART la capacidad de transformarse, señala Tønnes Nygaard, robotista de la Universidad Metropolitana de Oslo que no participó en el proyecto. «Los modos de locomoción rígidos y estrictos son una necesidad cuando se emplean técnicas robóticas tradicionales», añade. «Pero con este tipo de métodos provenientes de la robótica blanda, quizá podamos hacer algo un poco más flexible.»

Con el tiempo, esas técnicas adaptativas podrían ayudar a los robots a recorrer las distintas superficies y entornos del mundo real sin tener que cargar con sistemas de propulsión adicionales que reduzcan su movilidad. El equipo de Kramer-Bottiglio determinó que ART consume más o menos la misma cantidad de energía que los robots diseñados para un único medio.

La tortuga robótica aún no ha cruzado la línea de llegada: el prototipo actual aún requiere un cable de alimentación y comunicación, y sus movimientos son lentos y torpes. Pero los investigadores se afanan en mejorar estos aspectos. «Me emociona ver lo lejos que han llegado», valora Nygaard. «Y tengo mucho interés por ver qué logran de aquí a un par de años.»

Sophie Bushwick



FUENTE: «MULTI-ENVIRONMENT ROBOTIC TRANSITIONS THROUGH ADAPTIVE MORPHOGENESIS», ROBERT BAINES ET AL. EN *NATURE*, VOL. 619, PÁGS. 283-289, OCTUBRE DE 2022 (*referencia*); BROWN BIRD DESIGN (*gráfico*)

QUÍMICA

MÁQUINAS MOLECULARES CON DOS FUNCIONES

Un motor del tamaño de una molécula es capaz de girar y emitir destellos

Una de las mejores estrategias de la naturaleza para permitir el movimiento a escala celular se basa en potentes motores moleculares: moléculas complejas que transforman la energía química en energía mecánica para transportar materiales en el interior de las células, contraer fibras musculares o separar hebras de ADN.

Los químicos llevan desde 1999 diseñando moléculas sintéticas capaces de rotar 360 grados en respuesta a la luz o a estímulos químicos. Esos motores desempeñan una única función, como generar fuerzas sobre una superficie, trasladar cargamentos hasta sensores o alimentar dispositivos nanoscópicos. Sin embargo, los investigadores tienen serias dificultades para controlarlos o rastrearlos cuando los introducen en tejidos biológicos opacos.

Según una investigación publicada en *Science Advances*, una máquina molecular de nuevo diseño permite abordar ese problema, al alternar entre rotación y fluorescencia en función de las longitudes de onda de la luz que incide sobre ella. «No existen muchos compuestos que presenten dos respuestas distintas a la luz, y este es el primer motor con esa propiedad», asegura Maxim Pshenichnikov, espectroscopista de la Universidad de Groninga y coautor del artículo.

Pshenichnikov y sus colaboradores, bajo la dirección del químico orgánico Ben Feringa, nóbel de química en 2016, crearon una molécula con esa doble función enlazando un compuesto denominado trifenilamina a una máquina molecular básica. Eso permitió que el motor respondiera de forma diferente a la radiación según su frecuencia: la luz de baja energía suministraba al motor la potencia justa para girar, mientras que la de alta energía lo sobreexcitaba y lo llevaba a desprenderse del exceso de energía a través de la fluorescencia, es decir, emitiendo fotones. Además, a diferencia de las típicas máquinas moleculares impulsadas por radiación ultravioleta (la cual es perjudicial para los tejidos), el nuevo compuesto respondía a frecuencias infrarrojas, que penetran a más profundidad bajo la piel sin causar daños.

Un motor así resultaría de utilidad en aplicaciones que requieren una localización precisa. Por ejemplo, una máquina fluorescente podría interactuar con distintas estructuras celulares y emitir destellos que revelen su trayectoria mientras distribuye y activa un fármaco. «¿No sería increíble poder seguir el movimiento del motor en las células y usarlo para lograr interferencias mecánicas, detección y administración [de fármacos]?», se pregunta Feringa.

Salma Kassem, química de la Universidad de la Ciudad de Nueva York ajena al estudio, afirma que el diseño constituye un paso importante en el campo de la fotofarmacología. «Es difícil combinar comunicaciones y funcionalidad en una molécula pequeña sin que ambas propiedades interfieran entre sí. Este trabajo consigue separarlas de forma sencilla y elegante.»

Los investigadores pretenden aplicar el método a un motor con una función biológica, como la de unirse a ciertos receptores celulares. Entonces, probarán su eficacia en células o tejidos vivos. Lukas Pfeifer, químico orgánico de la Escuela Politécnica Federal de Lausana y autor principal del estudio, confía en «poder transferir la técnica fácilmente a motores elaborados con otros compuestos químicos».

Rachel Berkowitz

THOMAS FUCHS

MICROBIOLOGÍA

EL DESPERTAR ELÉCTRICO DE LAS ESPORAS

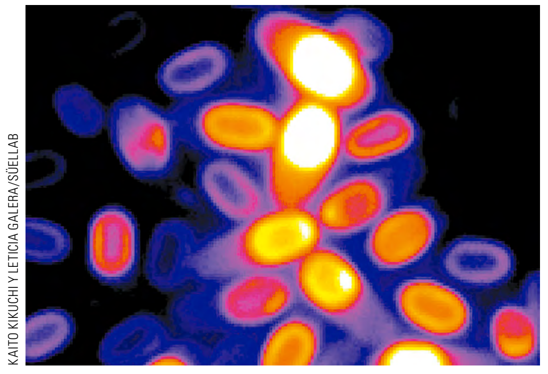
Una «cuenta atrás» eléctrica señala a las esporas bacterianas el momento idóneo para reactivarse

En ocasiones, procrastinar da sus frutos. Cuando el entorno se vuelve demasiado estresante, muchas bacterias guardan una parte de sí mismas en paquetes ultrarresistentes llamados esporas, que se apagan y esperan, a veces durante siglos, a que mejoren las cosas. ¿Cómo detectan estas motas, en apariencia muertas, las condiciones óptimas para revivir? Un artículo publicado en *Science* revela que las esporas bacterianas pueden programar una alarma eléctrica para decidir cuándo despertarse.

A las esporas no les afecta demasiado la inanición, la radiación, el calor abrasador, el frío glacial o, ni siquiera, el vacío. Por lo demás, parecen «inservibles», apunta Gürol Süel, biofísico de la Universidad de California en San Diego y uno de los autores del estudio. «Si lleváramos esas células al hospital», añade, «las declararían muertas nada más llegar».

Las esporas solo son indestructibles mientras se encuentran en estado latente. Así pues, han de evitar despertar (o germinar) cuando las condiciones son desfavorables, explica Peter Setlow, bioquímico de la Universidad de Connecticut ajeno al estudio. «Si "deciden" reactivarse en el momento equivocado, se acabó.»

El artículo revela un mecanismo que les ayuda a tomar esa decisión. Para formar una espora, las bacterias crean una copia de su ADN, la encierran en un pequeño compartimento, envuelven este en una capa protectora y, por último, se abren, liberando la espora y muriendo en el proceso. Mientras se forma, la espora acumula iones de potasio y crea un «condensador biológico» que almacena energía eléctrica, explica Süel. Cada vez que la espora encuentra nutrientes, deja escapar una pequeña fracción de su reserva de potasio, disipando parte de la carga eléctrica. Cuando eso ocurre suficientes veces, la energía almacenada desciende por debajo de un valor umbral y la espora germina, con posibilidades razonables de no morir de hambre.



KAITO KIKUCHI Y LETICIA GALERA/SÜELLAB

Las esporas de *Bacillus subtilis* muestran un potencial electroquímico variable.

«Es un avance significativo», valora Setlow. «Aporta una visión totalmente nueva de la germinación.» Averiguar el modo en que las esporas determinan la cantidad de nutrientes ayudaría a mejorar la seguridad alimentaria, porque las bacterias que forman esporas pueden sobrevivir a exhaustivos procesos de esterilización y provocar intoxicaciones alimentarias cuando se reactivan. El letargo también permite a algunos gérmenes patógenos eludir los ataques; despertarlos de manera prematura podría aumentar la eficacia de los tratamientos, por lo que «hay mucho interés práctico en conseguir que las esporas germinen rápido», señala Setlow.

Los resultados sugieren que ese tipo de «cuenta atrás» iónica podría ser esencial para la vida en la Tierra, afirma Süel. Las neuronas también se basan en la electricidad para saber cuándo activarse, y los autores hallaron que las fórmulas que describen su comportamiento también predicen bien el de las esporas. Las venus atrapamoscas se cierran gracias a una cuenta atrás eléctrica, y todas las células aprovechan los flujos de iones para procesar la energía.

«Esos potenciales eléctricos no son algo reciente: tienen miles de millones de años», apunta Süel. «¿Qué otros aspectos de la biología entenderíamos mejor si tuviéramos presente que no todo gira en torno a la expresión de genes, las proteínas y el ADN, sino que también están esos iones?»

Elise Cutt

OCELOS DE **MARIPOSA**

Se demuestra su efecto disuasivo sobre los depredadores

Los ocelos que algunas mariposas lucen en las alas no solo semejan a ojos reales, sino que parecen lanzar una mirada penetrante a los depredadores desde numerosas direcciones. Esta ilusión óptica puede amedrentar a los posibles atacantes y conceder un tiempo precioso para la huida.

Se sospecha que los ocelos con «pupilas» oscuras en el centro rodeadas por «iris» más claros tienen el aspecto de los ojos de los depredadores. Hannah Rowland, ecóloga del Instituto Max Planck de Ecología Química, en Jena, quería ver si la dirección de la mirada contribuía al efecto disuasor. En un **estudio** reciente entrenó a un grupo de pollos para que devorasen gusanos de la harina ocultos tras una hoja impresa con un par de ocelos colocada al final de un pasillo. Cuando las pupilas de los ocelos apuntaban en la dirección de donde venían las aves, estas corrían hacia el papel, pero después retrocedían y esperaban unos minutos antes de volver a la carga, un claro indicador de cautela. En cambio, si las pupilas apuntaban a cualquier otra dirección no vacilaban y se abalanzaban en segundos sobre los gusanos. Las pupilas situadas en el centro, aunque no eran tan eficaces como las que «miraban» en dirección a los pollos, también demoraban el ataque en comparación con las orientadas en otras direcciones.

«Esto indica que prestan atención hacia donde apuntan las pupilas impresas», explica Rowland. Cree probable que a los pollos esos ocelos concéntricos tan comunes en los insectos les parezcan un par de ojos atentos, sea cual sea el ángulo desde el que se acerquen.

Según Antonia Monteiro, bióloga evolutiva de la Universidad Nacional de Singapur, ajena al estudio, es una demostración fantástica de una teoría evolutiva sobre los ocelos. Pero puntualiza que los impresos en el papel medían varios milímetros más que los hallados en la naturaleza, por lo que no puede descartarse que el gran tamaño influyera en el efecto disuasivo.

Maddie Bender



MITSUHIKO IMAMORI/MINDEN PICTURES

EL FRENTE DE LA BARRERA de Thwaites se eleva hasta 40 metros sobre el mar. Esta inmensa placa flotante de hielo se está debilitando con rapidez.

CAMBIO CLIMÁTICO

AMENAZA DE DERRUMBE EN LA ANTÁRTIDA

Douglas Fox | Dos expediciones a la barrera de hielo de Thwaites advierten de que se podría desmoronar en menos de una década y que el vasto glaciar que retiene se deslizaría al mar

ELIZABETH RUSH

El 26 de diciembre de 2019, Erin Pettit cruzaba no sin dificultad una planicie helada de un blanco cegador arrastrando en un trineo de plástico un radar para hielo del tamaño de una maleta grande. La nieve quebradiza crujía a cada paso, prueba de que se acababa de derretir y congelar de nuevo tras unos días cálidos de verano. Inspeccionaba así una parte de la Antártida que hasta poco antes no había hollado el ser humano. Una larga hilera de banderines rojos y verdes que ondeaban al viento atados a cañas de bambú señalaba el camino seguro, sin traicioneras grietas ocultas bajo el manto de nieve. La barrera de hielo de Thwaites parecía intacta en la superficie, pero de haber sido así, ella no estaría allí.

Pettit estaba estudiando los defectos del hielo, equiparables a las fisuras invisibles en la pared de una enorme presa, que determinarían el momento en que se desmoronaría la barrera. Cuando llegue ese instante, el resto del casquete de hielo de la Antártida occidental que se halla tras ella podría acabar en el océano, lo cual elevaría el nivel del mar en todo el planeta e inundaría poblaciones costeras.

Vista desde la distancia, la barrera parecía lisa, pero a medida que caminaba, esta glacióloga de la Universidad Estatal de Oregón constató que la hilera de banderines subía y bajaba respecto al horizonte. Ello era un indicador inequívoco de que andaba por una superficie ondulada, algo importante, pues significaba que la masa de hielo subyacente era un terreno desigual, cosa que nadie esperaba. En las imágenes captadas por satélite, el centro de la barrera de hielo parece estable, pero Pettit aclara que no es así: «Podría venirse abajo de cuatro o cinco formas».

La barrera de hielo de Thwaites nace donde el inmenso glaciar del mismo nombre se encuentra con la costa occidental de la Antártida. La barrera es una placa flotante de cientos de metros de grosor que se interna medio centenar de kilómetros en el océano Antártico, con una extensión de entre 800 y 1000 kilómetros cuadrados. Durante los últimos veinte años, en paralelo al calentamiento planetario, el estudio mediante satélites y fotogrametría aérea ha revelado su deterioro. Este hecho ha disparado las alarmas, pues hace tiempo que los expertos consideran el glaciar Thwaites como la parte más vulnerable del casquete de la Antártida occidental. La barrera actúa como una presa que frena el avance del glaciar hacia el mar; si se desmoronase, ese movimiento se vería muy acelerado. Solo el glaciar contiene bastante hielo como para elevar unos 65 centímetros el nivel de los mares; pero el riesgo no acaba ahí, pues su desaparición desestabilizaría gran parte del resto del casquete occidental del continente, que alberga hielo en cantidad suficiente como para elevarlo otros 3,2 metros.

Hasta las previsiones más optimistas sobre las emisiones de los gases de efecto invernadero indican que para 2050 ya será imposible evitar un ascenso de al menos dos metros en los siglos venideros. Eso situará los hogares de como mínimo 10 millones de ciudadanos de Estados Unidos por debajo de la pleamar. Si el glaciar Thwaites acaba derrumbándose y desestabiliza el corazón de la Antártida occidental, la subida saltará hasta los cinco metros, lo que pondrá al menos a 20 millones de estadounidenses y a entre 50 o 100 millones de personas en el resto del mundo por debajo de la pleamar. Un ejemplo: la californiana Sacramento, que no es precisamente la primera ciudad que viene a la cabeza cuando uno piensa en el ascenso de las aguas marinas, perdería el 50 por ciento de sus barrios residenciales cuando el mar se adentrase 80 kilómetros a través de los deltas fluviales, de escasa elevación. El destino de miles de localidades costeras del planeta depende de los acontecimientos que están sucediendo en la Antártida en estos instantes.

Desde 1992, el glaciar ha desaguado un billón de toneladas de hielo y actualmente pierde otros 75.000 millones de toneladas cada año, una cifra que no para de crecer. Pero lo que sucederá en el futuro depende de fenómenos que no es posible

EN SÍNTESIS

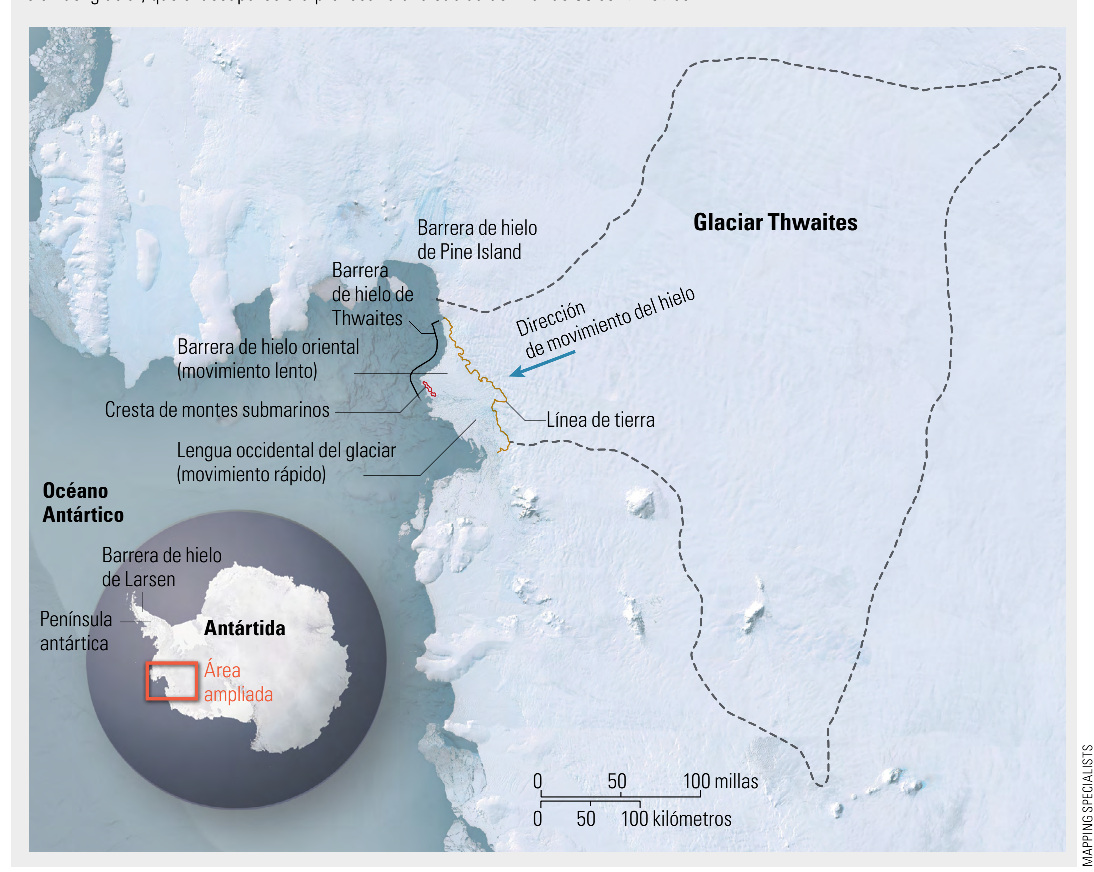
El glaciar Thwaites es una inmensa masa de la extensión de Bielorrusia que permanece separada del océano Antártico por una barrera de hielo.

El calentamiento de la atmósfera y del mar está acelerando la fusión y la disgregación de la barrera, de modo que, si el glaciar se deslizara entero al océano, el nivel de los mares subiría más de medio metro.

Recientes investigaciones en el lugar han descubierto un mecanismo que estaría acelerando el proceso, con un plazo que los expertos calculan en diez años o menos.

Al borde del deslizamiento

Con una extensión semejante a la de Bielorrusia, el glaciar Thwaites se precipita lentamente hacia el océano Antártico. El avance lo frena la barrera de hielo del mismo nombre, que permanece anclada al lecho marino a lo largo de la línea de tierra y apuntalada por las cumbres de montes submarinos. El problema estriba en que la creciente fragmentación de la barrera está acelerando la destrucción del glaciar, que si desapareciera provocaría una subida del mar de 65 centímetros.



estudiar desde el aire: las fallas de la barrera que amenazan con provocar el derrumbamiento y acelerar la destrucción del glaciar. Por esa razón, en 2018 el Consejo Nacional de Investigaciones Ambientales británico y la Fundación Nacional de Ciencias estadounidense crearon la Colaboración Internacional del Glaciar Thwaites, una iniciativa dotada con 50 millones de dólares con el propósito de estudiar a fondo el glaciar y su barrera.

Este proyecto reunió a ocho grupos de investigación, entre ellos uno que en septiembre advirtió que el retroceso del glaciar era mayor de lo previsto hacía pocos años. Dos de esos grupos visitaron la barrera de hielo oriental de Thwaites entre noviembre de 2019 y enero de 2020. El equipo de Pettit examinó los defectos estructurales de la parte central y las corrientes marinas que circulan bajo ella. Yo los acompañé en calidad de periodista agregado, no sin ganarme el derecho desempeñando tareas que a menudo implicaban empuñar una pala. El segundo equipo investigó el borde posterior de la barrera que discurre a lo largo del litoral sumergido mediante submarinos teledirigidos que, introducidos a través de pozos perforados en el hielo, exploraron un entorno crucial donde la barrera se derrite con rapidez, bajo 600 metros de hielo. Lo que observaron es alarmante. La barrera «probablemente desaparecerá mucho más deprisa de lo esperado», advierte Pettit.

El casquete antártico no cesa de sorprender a quienes lo estudian. En febrero de 1958, a 700 kilómetros tierra adentro en la Antártida occidental, unos investigadores barrenaron la nieve hasta cuatro metros de profundidad para depositar en el fondo 450 gramos de explosivo.

La detonación lanzó la nieve por los aires con un sordo *puff* mientras los geófonos orientados hacia las profundidades del hielo captaron las ondas de sonido reflejadas por el lejano lecho de roca. A partir del tiempo de retorno, Charles Bentley, en aquel entonces investigador predoctoral de la Universidad de Columbia, hizo un descubrimiento asombroso: el hielo en ese punto tenía más de 4000 metros de grosor (varias veces más de lo esperado) y descansaba sobre un viejo lecho oceánico, a 2500 metros bajo la superficie del mar.

En la década de 1970 aparecieron los radares para hielo transportables en avión. Los análisis efectuados sobrevolando diversos puntos de la región confirmaron que el casquete occidental de la Antártida reposa sobre una vasta cuenca, más profunda en el centro, cuyos grandes glaciares desaguan al mar a través de agujeros en los bordes exteriores de la misma. A finales de esa década, ni siquiera después de que la comunidad científica declarase ante el Congreso de los Estados Unidos acerca del dióxido de carbono y los peligros del calentamiento global, casi nadie pensaba que el hielo antártico se fundiría en tan poco tiempo. Pero en 1978, John Mercer, glaciólogo de la Universidad Estatal de Ohio, dio la voz de alarma al advertir que la Antártida occidental representaba «una amenaza catastrófica». Si el casquete polar perdiese las barreras que lo separan del mar, podría desmenuzarse más rápido de lo que nadie imaginaba. Tres años más tarde, Terry Hughes, glaciólogo de la Universidad de Maine, señaló dos glaciares costeros, Thwaites y Pine Island, como puntos débiles donde era más probable que comenzase el desmoronamiento del casquete. En un par de artículos publicados en 1998 y 2001, Eric Rignot, glaciólogo del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, confirmó que, en efecto, el grosor de ambos glaciares estaba menguando por la fusión de su parte inferior, que permitía la entrada del mar hacia tierra, por debajo del hielo.

Otros estudios aéreos ulteriores han revelado que el glaciar Thwaites despierta especial preocupación. El suelo sobre el que se asienta tiene un desnivel continuo que gana en profundidad conforme se adentra en tierra firme y se aleja del mar, de modo que el agua marina comparativamente cálida se abre paso bajo él y lo derrite por debajo. A medida que el hielo pierda espesor y peso, el glaciar se elevará y flotará sobre la densa y cálida agua infiltrada, lo cual acelerará a su vez la penetración de esta hasta que, en algún momento, llegue a la fosa de 2500 metros ubicada en el corazón del continente. Si eso sucediera, «se

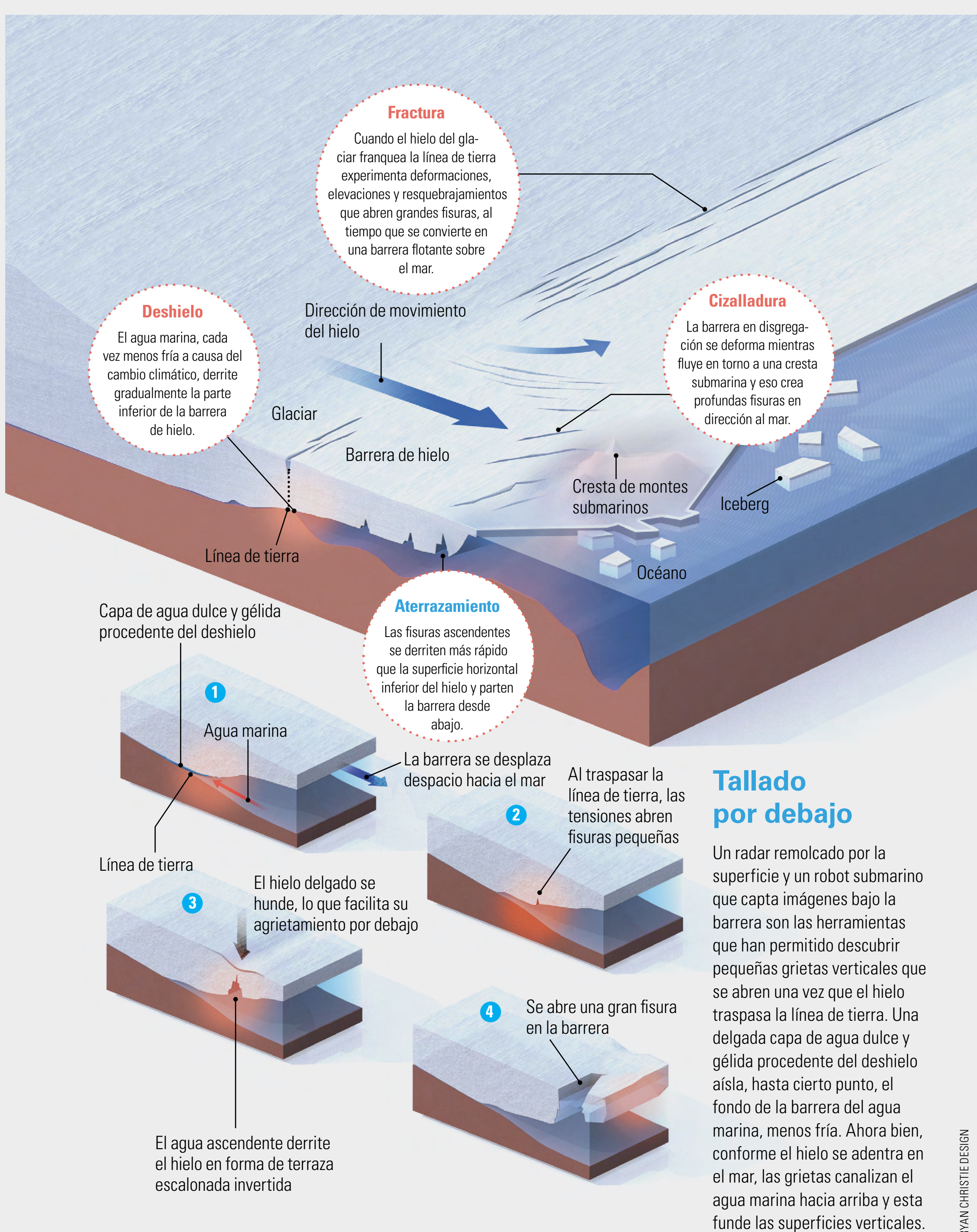


DOUGLAS FOX

LA LENGUA OCCIDENTAL DEL THWAITES se ha desmenuzado en cientos de icebergs que parecen altiplanos, alternados con hielo marino de quizás un metro de grosor, todo cubierto por un manto de nieve.

Procesos que disgregan la barrera de hielo

Expediciones recientes han revelado nuevos mecanismos que agrietan la barrera de hielo de Thwaites con mayor intensidad y rapidez de lo esperado. La suma de estos procesos podría desintegrarla en un banco de icebergs en menos de diez años. El descubrimiento más reciente son las terrazas invertidas que se expanden deprisa cortando el hielo desde abajo.



Tallado por debajo

Un radar remolcado por la superficie y un robot submarino que capta imágenes bajo la barrera son las herramientas que han permitido descubrir pequeñas grietas verticales que se abren una vez que el hielo traspasa la línea de tierra. Una delgada capa de agua dulce y gélida procedente del deshielo aísla, hasta cierto punto, el fondo de la barrera del agua marina, menos fría. Ahora bien, conforme el hielo se adentra en el mar, las grietas canalizan el agua marina hacia arriba y esta funde las superficies verticales. Este proceso forma terrazas que se extienden hacia arriba, hasta convertirse en enormes fisuras que provocan el desprendimiento de icebergs en el océano.

VIOLET FRANCES PARA BRYAN CHRISTIE DESIGN

desprendería entero el casquete de la Antártida occidental», advierte Ted Scambos, glaciólogo de la Universidad de Colorado que viajó con el equipo de Pettit en 2019 y 2020.

El glaciar desciende hasta el mar en dos brazos que se mueven a velocidades distintas. El brazo «rápido» del lado oeste es una frágil lengua de hielo flotante. En las imágenes captadas por satélite parece un parabrisas hecho añicos, compuesto por cientos de icebergs de uno o dos kilómetros de ancho que vagan a la deriva hacia el océano. El brazo «lento», en el lado este del glaciar, es una barrera de hielo más pequeña que ha permanecido más estable durante años. Su límite frontal reposa sobre las crestas de una cadena de montes sumergidos, a 40 kilómetros de la costa, que actúa como contrafuerte y mantiene la barrera de una sola pieza.

Pettit y su equipo eligieron como destino para su expedición esa barrera oriental que los montes mantienen cohesionada. En las imágenes de satélite, la región central de la barrera se veía relativamente estable, con una superficie lo bastante lisa como para que aterrizaran dos pequeños aviones con esquís. Un par de alpinistas experimentados localizarían las grietas ocultas y delimitarían rutas seguras para que el grupo se desplazara sin peligro. A Pettit le preocupaba que visitar una parte de la barrera sin daño aparente redujese sus posibilidades de descubrir algo nuevo, pero no fue así.

El trabajo de campo en la Antártida exige trajinar toneladas de combustible, víveres y otro material de supervivencia por adelantado, cosa que exige numerosos medios de transporte, trabajadores y campamentos. En las expediciones al Thwaites se transportaron decenas de toneladas de equipos y provisiones en barco, avión y convoyes de vehículos oruga a lo largo de cientos de kilómetros de casquete helado que habían sido inspeccionados de antemano en busca de simas y grietas. La Prospección Antártica Británica y el Programa Antártico de Estados Unidos enviaron parte del material con uno o dos años de antelación. Aun así, hasta ese margen de previsión se queda corto para evitar complicaciones en la Antártida.

En septiembre de 2019, dos meses antes de mi incorporación para partir juntos a nuestro destino, el grupo de Pettit recibió nuevas imágenes donde se veían dos fisuras abiertas recientemente en la barrera de hielo. Las hendiduras se habían originado en la zona donde el hielo contacta con la sierra submarina y se habían propagado hacia el interior, en dirección a la costa, hasta escasos cinco kilómetros del destino planeado. Los responsables de la expedición temían que una pudiese resquebrajarse más y llegar hasta el campamento, pero se decidió seguir adelante vigilándolas por satélite desde Estados Unidos. Después de que una serie de tormentas retrasara la expedición unas semanas, al fin llegamos a la barrera occidental de Thwaites a mediados de diciembre. Montamos una hilera de tiendas que procuramos resguardar de los incesantes vientos del este levantando muros con bloques de nieve compactada, cortados a mano, y nos preparamos para lo que prometía ser un mes de arduo trabajo.

El glaciar contiene bastante hielo como para elevar 65 centímetros el nivel de los mares

Los dos primeros días fueron relativamente cálidos. Las botas se hundían en la nieve medio fundida, y brotaron charcos alrededor de las tiendas. A unos ocho kilómetros al sur se veía una cadena de peñascos gigantescos de hielo. Ese relieve tan accidentado señalaba la zona de transición entre el glaciar enclavado en tierra firme y la barrera flotante, donde el hielo se agrieta y deforma.

En cuanto la nieve se endureció al bajar la temperatura, Pettit inició largas caminatas en las que arrastraba un radar a lo largo de líneas prefijadas. Este ofrecía perfiles en dos dimensiones de las capas internas de la barrera de hielo, de modo similar a lo que hace la resonancia magnética con el cuerpo del paciente. Aquellas primeras observaciones resultaron más interesantes de lo esperado.

El radar detectó que las capas situadas en los primeros 25 metros de espesor eran lisas y casi planas, mientras que debajo se volvían rugosas y aserradas de repente. Pettit supuso que las capas aserradas ya debían existir desde que el hielo traspasara el lecho rocoso de la costa y comenzara a flotar en el mar, quizá quince años




DOUGLAS FOX

ERIN PETTIT arrastra un radar de exploración (*izquierda*) cuyas ondas penetran en la masa helada de la barrera. Esta geóloga caminó kilómetros y kilómetros desde el campamento base, donde se decidió resguardar las tiendas del viento inclemente con muros de bloques de nieve cortados a mano (*derecha*).

antes; esa transición abrupta las modeló con esa forma. Por su parte, las capas lisas debieron de surgir por la acumulación de la nieve caída desde entonces, cuando el hielo ya flotaba.

Lo más sorprendente es que la parte inferior de la barrera, un lugar nunca visto por el ojo humano, presentara un orden inesperado, como si hubiera sido esculpida a propósito. El aspecto era ondulado con una serie de zanjas perpendiculares a la dirección de desplazamiento del hielo, como las olas que bañan la costa. Cada zanja medía entre 500 y 700 metros de ancho y sus bordes llegaban a alcanzar los 50 metros de altura, similares a un edificio de doce plantas. «Son enormes», me dijo Pettit. Lo más raro era que las paredes de las zanjas no eran lisas, al contrario de lo que se esperaría del hielo que se derrite, sino terrazas escalonadas con una sucesión de cortes verticales de unos cinco u ocho metros cada uno, como las laderas de una mina a cielo abierto. «No sabemos qué son esos escalones», confesó.

Esas zanjas no se habían detectado en exploraciones precedentes. Los datos de radar aéreo se obtienen desde aviones que vuelan a más de 150 kilómetros por hora, de modo que las lecturas obtenidas son la media de una larga extensión de hielo. Pettit arrastró el radar por la nieve a unos meritorios tres kilómetros por hora, una lentitud que le permitió captar imágenes mucho más detalladas.

Al mismo tiempo que ella echaba un primer vistazo a las extrañas estructuras aterrazadas, sus colaboradores daban con los primeros indicios de otro fenómeno insólito: la parte inferior del hielo no se derretía como esperaban. El 2 de enero tomé con apetito el desayuno de gachas deshidratadas en compañía de un posdoctorando que trabaja con Pettit, Christian Wild. A continuación montamos juntos en una moto de nieve y nos metimos en una ventisca. El ronroneo del motor quedaba amortiguado y la tenue luz se filtraba desde todas direcciones ocultando cualquier sombra, relieve o pista de los baches que nos hacían saltar del asiento. Seguíamos las indicaciones del GPS con la visibilidad justa para vislumbrar los banderines que surgían de la nada y que en un instante se desvanecían de nuevo entre la nube de copos de nieve.

Wild midió en diversas paradas el grosor de la barrera con un radar de alta precisión, con escasos milímetros de error. Una semana antes había hecho lo mismo en los mismos puntos. Puesto que las estimaciones por satélite parecían indicar que la barrera perdía de media dos o tres metros de espesor al año, esperaba encontrar de tres a seis centímetros menos de hielo que la semana anterior. Se quedó atónito al ver que apenas había variado, y todo lo que pudo decir al final de aquella larga jornada fue que «no tenía sentido».

Otros miembros del equipo se preparaban en el campamento para medir la temperatura de las corrientes marinas que fluían por debajo de la barrera. Durante varios días cargaron

6000 kilogramos de nieve dura, bloque a bloque, en un tanque de lona impermeable del tamaño de un *jacuzzi* grande. Fundieron la nieve y calentaron el agua para abrir con ella un agujero de la anchura de un plato a través de 250 metros de hielo. Scambos bajó varios sensores por el pozo hasta alcanzar el agua marina del fondo. Por espacio de uno o dos años, los sensores, alimentados en parte con paneles fotovoltaicos instalados en una pequeña torre de acero, medirían la temperatura, la salinidad y la velocidad de las corrientes.

Las primeras mediciones mostraron que, en efecto, bajo la barrera fluía agua densa y cálida. Dos grados por encima del punto de congelación podían «bastar para derretir muchos metros de hielo en un año», me explicó Scambos. Aun así, el hielo no se calentaba porque una capa de agua muy fría cubría el vientre de la barrera. Procedente del derretimiento del glaciar, aquella agua gélida contenía poca sal, por eso flotaba y envolvía la barrera por debajo aislándola del agua subyacente, más salada y densa pero no tan fría.

Al término de la expedición, el equipo de Pettit había encontrado una serie de indicios que ponían en entredicho las ideas precedentes sobre la barrera de hielo. En primer lugar, el vientre estaba erosionado por profundas zanjas aterrazadas. En segundo lugar, parecía que el hielo no estaba perdiendo grosor en los puntos medidos por Wild, hecho que contradecía los sondeos por satélite. Por último, la parte inferior de la barrera no sufría los efectos del calor procedente de las aguas profundas al permanecer aislada por una capa de agua gélida menos densa que flotaba encima de ellas. Estos descubrimientos resultaban difíciles de explicar, pero otra expedición a un lugar no muy alejado de allí daría sentido a todas esas sorpresas.

Ocho kilómetros al sudeste del campamento de Pettit, el otro grupo de investigación echaba un primer vistazo a la línea de tierra de la barrera, el largo contorno del terreno donde el hielo abandona el suelo para flotar en el mar. Creían que, en ese lugar inaccesible, el vientre de la masa de hielo se derretía más deprisa.

El 11 de enero de 2020, los investigadores del campamento introdujeron con la ayuda de un cable una especie de torpedo de color negro y amarillo, de dos palmos de diámetro y 3,5 metros de largo, por un estrecho agujero horadado en el hielo. Ingenieros dirigidos por Britney Schmidt, científica planetaria y polar de la Universidad Cornell (entonces en el Instituto Tecnológico de Georgia), habían invertido ocho años en el diseño de este ingenio submarino teledirigido, al que habían llamado Icefin (aleta de hielo). Ya lo habían conducido bajo la banquisa de más de un metro de espesor y bajo los bordes de dos pequeñas barreras de hielo, de donde se podía recuperar con un cabrestante si quedaba atascado, pero nunca lo habían hecho descender a través de una losa de semejante profundidad.

Schmidt piensa en el Icefin como en el prototipo de una sonda que algún día explorará vastas masas de agua en el sistema solar exterior, ocultas bajo 10 o 20 kilómetros de hielo en las lunas de Júpiter y Saturno. Allí en la Antártida registraría la temperatura, las corrientes marinas y la velocidad de fusión del hielo inferior. Quizá más importante aún es que las cámaras de vídeo y el sonar con que iba equipado permitirían explorar ese entorno virtualmente inaccesible. El objetivo de Schmidt no era validar ninguna de las observaciones de Pettit, pero las dos investigadoras trabajaban relativamente cerca en aquella barrera de hielo, por lo que la casualidad era un factor en la ecuación.

Después de atravesar 600 metros de hielo, el Icefin se sumergió al fin en la capa de agua marina, de solo 50 metros de profundidad. Schmidt lo controlaba con un mando de la videoconsola PlayStation 4 desde una tienda cercana. Un monitor le mostraba el techo con aspecto cristalino de la parte inferior del glaciar, que corría por la pantalla mientras el vehículo avanzaba enviando las imágenes por un cable de fibra óptica. Durante ocho horas lo dirigió hasta dos kilómetros del agujero y por espacios angostos donde el hielo superior y el pedregoso lecho marino marrón grisáceo quedaban separados por menos de un metro de agua. Aquel suelo acababa de quedar al descubierto, pues el hielo en retroceso se había separado de él días antes. A veces, un pez o una gamba cruzaba ante el objetivo de la cámara.

En casi todos lados, las corrientes eran débiles y el agua cercana al hielo estaba estratificada. Cuando el vehículo se acercaba a la línea de tierra, el agua próxima al hielo estaba a lo sumo un grado por encima del punto de congelación, a pesar de que a escasos metros circulaba más caliente. Las lecturas indicaban que la parte inferior se derretía a un ritmo moderado, de unos dos metros por año. En algunos lugares, el agua derretida se había vuelto a congelar en

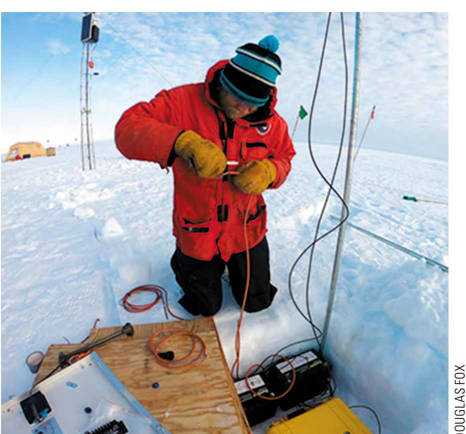
el vientre del glaciar y aparecía como una capa reconocible de hielo de varios centímetros de espesor. Las observaciones por satélite habían mostrado que el grosor de esta zona disminuía con rapidez, por lo que los hallazgos no coincidían con las previsiones del equipo, relata Keith Nicholls, oceanógrafo de la Prospección Antártica Británica y codirector de la investigación en el campamento. La ausencia general de deshielo le dejó desconcertado: «Es extrañísimo, en serio».

A lo largo de la inmersión, el Icefin encontró de vez en cuando la pista que luego ayudaría a explicar no solo esas observaciones inesperadas, sino también el hallazgo del equipo de Pettit. En su lento recorrido por el vientre relativamente plano de la barrera, llegó a un corte vertical que se adentraba en el hielo, una terraza escalonada como la que Pettit había detectado con el radar. Las paredes de la terraza parecían fundirse mucho más rápido que la superficie horizontal de alrededor. En el vídeo se veían ondas borrosas en el agua, donde la luz del Icefin se refractaba al atravesar los remolinos de agua salada y dulce entremezcladas. A menudo también captó hendiduras oscuras en el hielo, grietas basales de hasta 100 metros de ancho. Schmidt adentró el aparato en varias y también encontró en ellas espirales borrosas de agua, un indicador de que el hielo se estaba derritiendo deprisa.

En el encuentro de la Unión Geofísica de Estados Unidos (AGU, por sus siglas en inglés) celebrado en diciembre de 2021, el equipo de Schmidt presentó un análisis minucioso de los datos del Icefin, con el cual confirmaban que las superficies verticales del hielo desempeñan un papel clave en la desaparición de la barrera de Thwaites. Peter Washam, investigador de la Universidad Cornell, anunció que las paredes de las terrazas se estaban derritiendo cinco veces más rápido que las superficies horizontales y que perdían 10 metros o más de hielo cada año. Las grietas basales se fundían a un ritmo aún mayor, hasta 10 veces más, de modo que perdían unos 20 metros al año. Washam destacó que las corrientes se volvían turbulentas al encontrar esas superficies escarpadas, lo que provocaba un contacto más intenso del agua con el hielo y aceleraba aún más el proceso.

Los escalones verticales podrían haber surgido a partir de pequeñas ondulaciones presentes en el vientre de la masa de hielo al separarse esta del lecho y dejar atrás la tierra firme. En esos puntos desiguales, el hielo se fracturaría y se derretiría más deprisa, lo que haría aumentar la pendiente, y esto a su vez aceleraría el deshielo, que haría aún más acusada la pendiente, hasta formar así una pared de terraza casi vertical. Scambos explica que, a medida que el hielo de las superficies verticales se derrite, las terrazas crecen en dirección horizontal; una grieta basal de 10 metros de ancho podría llegar hasta los 30 o 50 metros en un año. El vientre de la barrera





DOUGLAS FOX

CHRISTIAN WILD prepara un radar de gran precisión (*izquierda*) con el que medirá el grosor de la barrera de hielo con un margen de error de milímetros. Martin Truffer monta el equipo de sensores (*arriba*) que registraría el avance y las alteraciones de la barrera hasta dos años después de que abandonaran el glaciar Thwaites.

de Thwaites no se derrite de manera uniforme, sino que es un proceso sumamente localizado que depende de la interacción de las corrientes con la topografía.

Que el hielo se funda sobre todo en las caras verticales explicaría en parte por qué Wild no detectó indicios de adelgazamiento en muchos de los puntos de medición. De vuelta a casa en 2020, Pettit representó los puntos de Wild en las líneas de su sondeo por radar que mostraba las paredes aterrazadas. Todas las mediciones de Wild coincidían con secciones horizontales de hielo, nunca con las verticales, , y quizá por eso se derretían poco. A Pettit no le extraña, porque opina que la distancia que separa las paredes es lo suficientemente grande como para que Wild no pudiera dar con una de ellas al azar. Asimismo, el equipo de sensores que Scambos dejó allí parece estar algo alejado de la pared más cercana y, de igual manera, apenas ha detectado adelgazamiento del hielo.

Si las paredes verticales se derriten rápido, deberían extenderse en sentido horizontal en la base del hielo, según Pettit. Tarde o temprano una de esas superficies verticales pasará por debajo del equipo de sensores «y veremos una pérdida enorme de hielo en poco tiempo», quizá de ocho metros en una semana. «Si viéramos eso, sería una pasada», añade.

Las observaciones de Schmidt también podrían explicar otro aspecto de las zanjas aterrazadas que Pettit descubrió cerca del campamento. Al volver a casa examinó las lecturas del radar y reparó en algo peculiar: en el segmento más elevado de las zanjas solía ver un conjunto de reflexiones con forma de U invertida, la señal característica de una fisura que penetra hacia el techo. Esto podría suceder porque el hielo situado sobre la zanja, más fino, se curva como un puente endeble y crea una concavidad abultada que acaba agrietándose. Esa grieta basal recién formada quedaría bañada por el agua subyacente, que derretiría sus paredes y ensancharía el hueco que las separa. Al crecer la grieta, el techo alcanzaría la anchura suficiente para agrietarse y desplomarse, reiniciando el ciclo que generaría más grietas hielo arriba.

Las descomunales zanjas aterrazadas podrían haber nacido como grietas aisladas, iguales que las que Schmidt halló a ocho kilómetros, sobre la línea de tierra. Elisabeth Clyne, doctoranda de la Universidad Estatal de Pensilvania que analizó las lecturas del radar en torno a la línea de tierra, detectó señales de que cuando las grietas avanzaban hacia el mar a unos 600 metros por año, ya empezaban a ensancharse en sentido horizontal y vertical por los ciclos de deshielo, hundimiento y fisura. También lo comunicó en la asamblea de la AGU de 2021. Pettit sospecha que, en algún momento, esas zanjas penetrarán la barrera hasta atravesarla o, por lo menos, alcanzarán tal tamaño que facilitarán que la barrera se rompa a causa de otras tensiones. Este proceso podría disgregarla en una masa de fragmentos gigantes que vagarían a la deriva y ya no contendrían uno de los glaciares más extensos de la Antártida.

A pesar de que la lengua occidental del glaciar Thwaites ha perdido un 80 por ciento de su superficie en el último cuarto de siglo, la oriental solo se ha encogido un 15 por ciento. El frente de la lengua sigue en contacto con la cresta de montes submarinos, que llega hasta unos 400 metros bajo el mar. La presión que ejerce ese contrafuerte mantiene unido el hielo, aunque la situación podría no durar demasiado.

Wild publicó en febrero de 2012 un análisis de las mediciones por satélite donde se mostraba que la parte frontal del hielo en contacto con la cresta submarina perdía unos 30 centímetros al año. A ese paso se desprenderá de la cima de los montes en los próximos 10 años. Predice que, cuando eso suceda, la barrera de hielo occidental se «desmenuzará» en un banco de icebergs. Pero el fin podría estar más cerca. Si el deshielo acelerado de las terrazas impulsa las grietas hacia arriba, las tensiones mecánicas a las que ya está sometida la barrera podrían aumentar.

El hielo ya se está haciendo añicos por encima de la cresta. En la última década se ha fracturado hasta convertirse en un masa flotante de largos fragmentos que se mantiene unida por el mero efecto de la presión y la fricción. Andrew Fleming, de la Prospección Antártica Británica, montó una animación a partir de una serie de imágenes de satélite en la que se aprecia cómo esos fragmentos se deslizan unos respecto a otros con creciente facilidad. En consecuencia, la barrera en descomposición se empieza a deformar y a fluir alrededor de la cresta submarina más deprisa y en nuevas direcciones, como la corriente del río que se divide al chocar con una roca. El monte sumergido, antaño un contrafuerte estabilizador, actúa ahora como una cuña que abre fisuras profundas en dirección a tierra firme. Son las mismas fisuras que el

satélite nos mostró justo antes de partir hacia la Antártida en 2019.

«Se cae a pedazos», comenta Karen Alley, glacióloga de la Universidad de Manitoba y autora de un análisis de los patrones de flujo del hielo publicado en noviembre de 2021. Aunque el hielo se esté separando de la cresta submarina más despacio de lo previsto, otros fenómenos podrían condenar la barrera. Puede que las hendiduras profundas se alarguen hasta cruzarse con las zanjas que se elevan en el hielo y avanzan mar adentro desde la costa, una conjunción de defectos estructurales que provocaría la destrucción de la barrera entera.

El destino de la barrera oriental será similar al de la lengua occidental en todos los supuestos: los fragmentos que la forman se separarán y se alejarán a la deriva. Cuando eso pase, el brazo oriental del glaciar Thwaites se soltará de su anclaje, y el avance del otro brazo, el occidental, podría acelerarse. «Todo irá mucho más rápido una vez desaparezca [la barrera de hielo]», predice Scambos.

El equipo de Pettit abandonó el glaciar a finales de enero de 2020, pero sigue supervisando el estado de la barrera con instrumentos alimentados con energía solar que introdujeron en el agua perforando el hielo. En enero de 2022, Scambos y Wild regresaron al campamento durante un par de días caóticos para recoger los datos. La antena y las torres con los paneles solares, que en su día se elevaban a siete metros del hielo, habían quedado prácticamente enterradas bajo la dura nieve helada. Con la ayuda de dos compañeros localizaron los instrumentos sepultados con un radar para hielo. Luego abrieron pozos angostos de seis metros de hondo con una motosierra para recuperar las preciadas tarjetas de datos.

Con la esperanza de obtener un año más de datos con los instrumentos rescatados, Scambos reforzó las torres de acero que se habían doblado como si fueran de alambre y reconfiguró los módems que la electricidad estática generada por los vendavales había frito. Los sensores instalados en ellas habían registrado vientos de hasta 250 kilómetros por hora, una velocidad cercana a la de un huracán de categoría 5, que era el doble de lo esperado.

Los aparatos GPS de las estaciones indican que en los dos años y medio transcurridos desde su instalación, el movimiento de la barrera hacia el mar se ha acelerado y ha pasado de 620 a 980 metros al año. A bordo de un bimotor Twin Otter, en enero de 2022 Scambos y Wild observaron en la barrera varias grietas nuevas de tres kilómetros de largo y cientos de metros de ancho, en el punto donde el hielo se separa del lecho marino. Peñascos de hielo irregulares de 50 metros de altura dejaban a la vista capas profundas que no habían visto la luz en milenios. «Creo que la barrera se está soltando de todo lo que la retiene», cuenta Scambos. No solo lo está haciendo de su anclaje submarino, sino que al acelerarse también se está estirando y separando del glaciar situado más arriba.

Esto preocupó tanto al equipo que Pettit y Wild decidieron volver este pasado diciembre para instalar una nueva estación llamada BOB, de *Breakup Observer* «observador de la fragmentación». Esperan que la estación sobreviva el tiempo necesario para registrar la agonía de la barrera al romperse en pedazos. Quizá no falte mucho.

Scambos especula que cuando Pettit y Wild estén en el campamento de la barrera podrían despertarse una buena mañana flotando en un iceberg desprendido. «Si no están cerca de una de las fisuras, ni siquiera se darán cuenta» de entrada, añade. Los sonidos y las vibraciones generadas por la grieta al aflorar a la superficie podrían ser imperceptibles. Habría pequeñas pistas que los alertarían poco a poco. La rotación del iceberg les daría la impresión de que el GPS señala una dirección equivocada y que el movimiento del Sol se ha trastocado. «Sería como estar sobre un nenúfar gigante y tener como única referencia la posición que ocupa el disco solar en un momento concreto del día», concluye.

Douglas Fox sobre ciencia y medioambiente. Ha colaborado con *Nature*, *Science*, *New Scientist* y muchas otras publicaciones. Su trabajo ha sido publicado en *The best American science and nature writing.*



EN NUESTRO ARCHIVO

La fusión de los hielos antárticos. John Horgan en *IyC*, agosto de 1993.
Dinámica de los casquetes glaciales. Robin E. Bell en *IyC*, abril de 2008.
La fusión de la Antártida en directo. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2012.
¿Se está desmoronando la Antártida? Richard B. Alley en *IyC*, septiembre de 2019.



ASTRONOMÍA

MISTERIOSOS ESTALLIDOS DE RADIO

Adam Mann | Veinte años después de su descubrimiento, las explosiones rápidas de radio siguen planteando numerosos interrogantes

MARK ROSS

En el año 2001, un radiotelescopio australiano captó una fugaz explosión procedente de más allá de la Vía Láctea, pero nadie reparó en el fenómeno. La potente detonación, una «explosión rápida de radio» (FRB, por sus siglas en inglés), pasó inadvertida durante más de un lustro, hasta que la descubrió un grupo de investigadores que examinaba datos de archivo. Según uno de ellos, el astrofísico de la Universidad de Virginia Occidental Duncan Lorimer, el estallido liberó en unas milésimas de segundo tanta energía como el Sol en un mes.

Hoy en día, sabemos que esas explosiones, que se han convertido en uno de los temas más candentes de la astrofísica, se producen al menos 800 veces al día por todo el cielo. Aunque aún se desconocen muchos aspectos de las FRB, en el último año ha empezado a emerger una imagen más clara. «Creo que estamos más cerca de entender qué son algunas de esas ráfagas de radio», asegura Ziggy Pleunis, astrofísico de la Universidad de Toronto. «Pero, conforme hemos ido haciendo progresos, nuevos hallazgos han suscitado preguntas adicionales.»

El estudio de las FRB ha alcanzado un punto de inflexión. Un aluvión de nuevas detecciones y análisis detallados ha respaldado o descartado ciertos modelos sobre su mecanismo interno, y varios proyectos en ciernes deberían ayudar a acotar aún más las posibilidades. Entretanto, los científicos han comprendido que la brillante luz de una FRB guarda un registro de lo que contienen las profundidades intergalácticas que atraviesa de camino a la Tierra, por lo que aporta información única sobre las galaxias y el material que hay entre ellas.

EN SÍNTESIS

La detección de una «explosión rápida de radio» procedente de la Vía Láctea confirmó que algunos de estos estallidos se producen en estrellas de neutrones muy magnetizadas, aunque aún no se entiende bien el mecanismo.

Sin embargo, es poco probable que haya una explicación única para todas esas detonaciones, dada la existencia de fuentes puntuales y repetitivas, así como de una gran variación en la duración y el brillo de las ráfagas.

Las futuras observaciones podrían no solo dilucidar el origen de las explosiones cósmicas de radio, sino también usarlas para estudiar el contenido y los campos magnéticos de las regiones que atraviesan.

Magnetoestrellas

En abril de 2020, tres equipos de investigación independientes detectaron un enorme estallido de energía de radio que provenía de un magnetar situado en la Vía Láctea. Los magnetares son un tipo extremo de estrella de neutrones, el remanente del tamaño de una ciudad que queda cuando una estrella masiva explota en forma de supernova. El campo magnético de los magnetares es tan intenso que aproximarse a 1000 kilómetros de uno alteraría los núcleos atómicos y los electrones de nuestro organismo, disolviéndolo a todos los efectos.

Los magnetares ya eran uno de los principales candidatos que se barajaban como fuente de las FRB. Sin embargo, entre las pocas decenas de magnetares que se conocen en nuestra galaxia, nunca se había observado ninguno que produjera erupciones similares. El hallazgo de una breve y formidable ráfaga de radio procedente de un magnetar galáctico llamado SGR 1935+2154 era justo la pieza que les faltaba a los investigadores. Si esa misma explosión hubiera tenido lugar en otra galaxia, habría sido imposible distinguirla de las FRB habituales. «Fue un momento increíble para el campo», valora Kenzie Nimmo, astrónoma de la Universidad de Ámsterdam. «Dejó claro que al menos algunas FRB provienen de magnetares.»

No obstante, todavía se debate sobre el modo exacto en que los magnetares producen las FRB. Casi todas las teorías recurren a alguna suerte de seísmo estelar o a una explosión generada cuando las retorcidas líneas de campo magnético de un magnetar se rompen y vuelven a conectarse. Ese tipo de eventos podrían crear directamente el destello de una FRB o provocar una onda de choque que calentase el material circundante. Dicha onda incineraría el polvo y convertiría el gas en plasma, emitiendo luz a medida que se propaga.

Varios telescopios contemplaron un destello de rayos X que llegó justo después de la señal de radio de SGR 1935+2154, lo cual sugiere que el proceso que liberó la energía de radio también causó otros efectos más complejos. Y aún quedan muchos detalles por esclarecer. «¿Ese estallido ocurrió en la superficie de la estrella, en la magnetosfera o en el material situado en torno al magnetar?», se pregunta Emily Petroff, astrofí-

sica de la Universidad de Ámsterdam. «Lo cierto es que aún no nos hemos puesto de acuerdo.»

Rarezas cósmicas

Dadas las variaciones observadas en propiedades como el brillo o la duración de las FRB, no parece probable que una sola detección permita explicar todas esas explosiones. En el verano de 2021, el Experimento Canadiense de Cartografiado de la Intensidad del Hidrógeno (CHIME), un telescopio de la Columbia Británica dedicado a captar FRB, elaboró un catálogo con los 536 estallidos que había registrado durante su primer año de funcionamiento, lo que supuso multiplicar por cuatro el número conocido hasta la fecha. Ya se sabía que había dos tipos de FRB: aquellas que emiten sus señales de forma repetida y las que constituyen eventos únicos. Los datos de CHIME revelaron que esas dos clases de explosiones poseían características distintas y que las puntuales eran mucho más comunes que las repetitivas.

En promedio, las fuentes repetitivas producían ráfagas más prolongadas que los eventos únicos y emitían su luz en una banda de frecuencias más estrecha. Todavía no está claro si esta disparidad se debe a que los destellos se producen por un mecanismo diferente o si responde a otras cuestiones relacionadas con la edad o el entorno de sus progenitores. La situación recuerda al misterio que envolvía a otra clase de explosiones cósmicas: los estallidos de rayos gamma, que se generan en tres tipos de eventos distintos, como se demostró en la década de 1990. Los científicos esperan determinar si las FRB también se dividen en varias poblaciones, cada una de ellas con su propio origen.

El catálogo de CHIME incluye FRB procedentes de galaxias muy diversas, y eso debilita el vínculo con los magnetares, que surgen casi exclusivamente en galaxias que engendran estrellas masivas de vida corta. Sin embargo, en los datos de CHIME hay multitud de fuentes situadas en galaxias en calma, donde apenas se forman nuevas estrellas. «Los magnetares pueden explicar una parte de las explosiones rápidas de radio. Eso no lo discute nadie», señala Shami Chatterjee, astrónomo de la Universidad Cornell. «Pero ¿todas ellas? Casi seguro que no.»

Un artículo publicado en *Nature* en febrero de 2022 respalda esa afirmación. Utilizando los radiotelescopios que conforman la Red Europea de Interferometría de Muy Larga Base, un equipo de científicos localizó con suma precisión una fuente repetitiva, denominada FRB 20200120E. En un primer momento, el objeto se había ubicado en la cercana galaxia espiral M81, pero la interferometría de muy larga base reveló que, en realidad, se halla en el interior de un cúmulo globular, un antiguo conjunto de estrellas muy apiñadas. Esas agrupaciones suelen albergar estrellas con unos 10.000 millones de años, mientras que los magnetares solo perdurarían unos 10.000 años antes de convertirse en estrellas de neutrones más tranquilas. «Ese hallazgo lo cambia todo», indica Mohammadtaher Safarzadeh, astrofísico teórico de la Universidad Harvard. «Lo que está causando la FRB seguramente tiene la misma edad que el cúmulo globular y, desde luego, no es un magnetar.»

El objetivo último es usar las explosiones rápidas de radio para cartografiar la materia del universo

Algunos magnetares quizá surjan como resultado de la colisión entre dos estrellas de neutrones (un proceso de formación que aún no se ha confirmado), y eso podría explicar su presencia en los cúmulos globulares, matiza el astrofísico teórico Bing Zhang, de la Universidad de Nevada en Las Vegas. Pero nadie sabe con qué frecuencia ocurren tales eventos ni cuánto tiempo permanecerían activos los magnetares resultantes.

Otra observación que complica aún más la teoría de los magnetares es la de FRB 20180916B, también conocida como R3 por ser la tercera fuente repetitiva que se descubrió. Al principio, se pensaba que R3 estaba cerca de la región de formación estelar del centro de una galaxia espiral situada a unos 500 millones de años luz de la Tierra, pero luego se demostró que se hallaba en las afueras de esa galaxia. Eso sugiere que se trata de un objeto más viejo o que fue expulsado de su lugar de nacimiento. Y lo que es más extraño: las explosiones solo se producen durante una ventana de actividad de entre cuatro y cinco días que tiene lugar cada 16,35 días, lo que convierte a R3 en una fuente repetitiva periódica.

Los investigadores se han afanado en explicar esa peculiar regularidad. Una opción es que la fuente sea un magnetar que gira sobre su eje como una peonza, de modo que los estallidos unas veces se dirijan hacia nuestro planeta, y otras, en sentido contrario. Otra hipótesis es que se trata de un objeto en órbita alrededor de una segunda estructura, como un agujero negro envuelto en un disco de material, que oculta los eventos explosivos de manera cíclica. Incluso se ha propuesto que las ráfagas podrían provenir de un sistema binario de estrellas de neutrones cuyas magnetosferas interactúen de forma periódica, creando así una cavidad donde tendrían lugar las erupciones. «Ahora mismo, el campo es muy divertido porque hay un montón de posibilidades fascinantes», comenta Chatterjee.

Censos de materia

Los expertos en FRB siguen investigando cuestiones fundamentales. ¿Las fuentes no repetitivas son realmente eventos únicos o volverían a estallar si las observamos el tiempo suficiente? El magnetar de nuestra galaxia parece bastante tranquilo, pero ¿presentaba mucha más actividad en su juventud? ¿Podrían otros fenómenos exóticos, como una lluvia de asteroides sobre un agujero negro, generar señales similares a las de una FRB? Los científicos no cesan de publicar nuevas observaciones y teorías.

La colaboración CHIME está construyendo un conjunto de telescopios más pequeños que ayudarán a triangular las posiciones de un gran número de FRB. En unos años, los investigadores esperan conocer la ubicación exacta de cientos de eventos, quizás incluso mil. Además de dilucidar el enigma de las explosiones rápidas de radio, los datos permitirán realizar importantes mediciones cosmológicas.

Los astrónomos infirieron que las FRB provenían de más allá de la Vía Láctea porque las frecuencias altas llegaban unos milisegundos antes que las bajas. Esa dispersión de la luz ofrece información sobre la materia que atravesaron las ondas de radio en su viaje por el espacio. Los expertos creen que en el universo hay mucha más materia ordinaria de la que vemos en las estrellas y las galaxias, y sospechan que esa materia ausente se halla en el medio intergaláctico. En 2020, un equipo estudió un puñado de FRB para estimar la cantidad de material que había atravesado su luz y mostró que coincidía casi exactamente con la que se esperaba encontrar allí.

El objetivo último es usar las FRB para cartografiar la materia a lo largo del universo. Además, la luz de algunas explosiones está muy polarizada (las ondas han rotado por la acción de los campos magnéticos durante su trayecto), lo que podría dar información sobre el magnetismo en otras galaxias o en el espacio entre ellas. Entretanto, persiste el misterio sobre el origen de las FRB. «Estoy convencida de que, en el próximo decenio, nos vamos a llevar como mínimo una o dos sorpresas más, como el [estallido del] magnetar galáctico que ni siquiera sabíamos que debíamos buscar, y eso impulsará enormemente nuestra comprensión», aventura Petroff.

Si, como sospechan muchos astrónomos, algunas FRB no repetitivas se producen en eventos catastróficos como las colisiones entre estrellas de neutrones, vendrían acompañadas de ondas gravitacionales. En caso de que un radiotelescopio registrara una señal al mismo tiempo que el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) o sus homólogos de todo el mundo, algunos expertos se inclinarían por esa posibilidad. Y si la colisión engendrara un magnetar, ¿podría esa FRB cataclísmica y puntual dar lugar a una fuente distinta de explosiones repetitivas? El tiempo lo dirá.

Si nos guiamos por la historia reciente, es probable que las explosiones rápidas de radio sigan deparando emociones fuertes en los próximos años, concluye Lorimer. «Justo cuando parece que todo empieza a calmarse, llega un año lleno de descubrimientos extraordinarios.»

Adam Mann es periodista especializado en astronomía y física. Sus trabajos han aparecido en *The Wall Street Journal*, *National Geographic* y *Wired*, entre otras publicaciones.



PARA SABER MÁS

Fast radio bursts: An extragalactic enigma. James M. Cordes y Shami Chatterjee en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 57, págs. 417-465, agosto de 2019.

The physical mechanisms of fast radio bursts. Bing Zhang en *Nature*, vol. 587, págs. 45-53, noviembre de 2020.

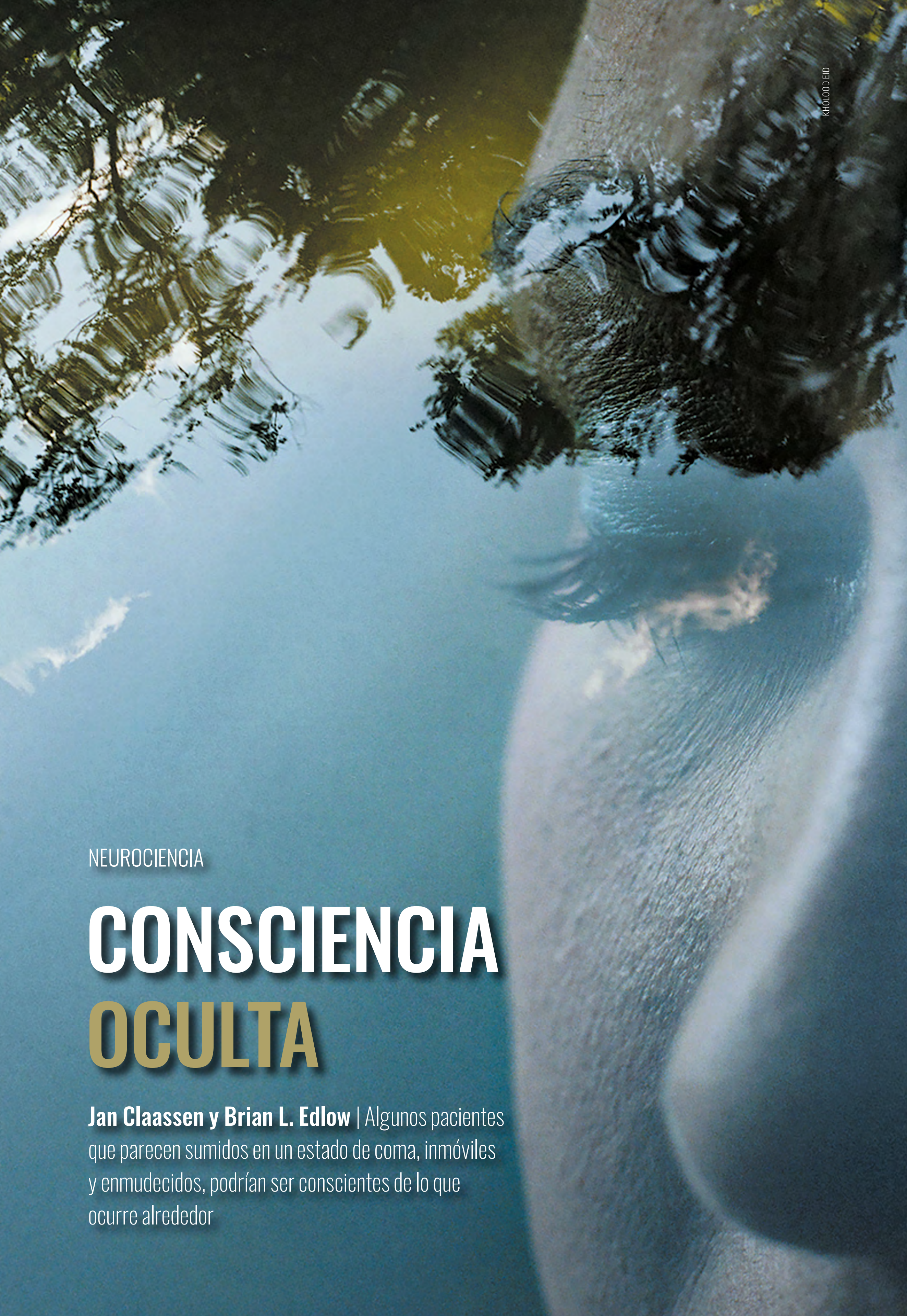
Fast radio bursts at the dawn of the 2020s. Emily Petroff, Jason W. T. Hessels y Duncan R. Lorimer en *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 30, art. 2, marzo de 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

El misterio de las explosiones rápidas de radio. Duncan Lorimer y Maura McLaughlin en *IyC*, junio de 2018.

El auge de las explosiones rápidas de radio. Katie Peek en *IyC*, enero de 2021.

Cientos de nuevas explosiones rápidas de radio. Davide Castelvecchi en www.investigacionyciencia.es, 11 de junio de 2021.



NEUROCIENCIA

CONSCIENCIA OCULTA

Jan Claassen y Brian L. Edlow | Algunos pacientes que parecen sumidos en un estado de coma, inmóviles y enmudecidos, podrían ser conscientes de lo que ocurre alrededor

Un equipo médico rodeaba la cama de Maria Mazurkevich con todos los ojos puestos en ella para intentar advertir una mínima reacción... en vano. La paciente, de 30 años, había ingresado días antes en el Hospital Presbiteriano de Nueva York (Universidad de Columbia). En casa se había desplomado inconsciente a causa de una súbita hemorragia cerebral que estaba ejerciendo una gran presión sobre zonas vitales del cerebro. El equipo médico y de enfermería de la unidad de cuidados intensivos neurológicos buscaba cualquier signo de que pudiera oírlos. Permanecía conectada a un respirador mecánico y sus constantes vitales eran estables, pero no mostraba indicio alguno de consciencia.

Los padres, también a su lado, preguntaron: «¿Podemos hablar con ella?, ¿nos oye?». Maria no parecía ser consciente de nada. Uno de nosotros (Claassen) formaba parte del equipo médico y cuando le pidió que abriera los ojos, levantara dos dedos o moviese los dedos de los pies, no se produjo ningún movimiento. Sus ojos no seguían las señales visuales. Pese a todo, sus seres queridos afirmaban que «seguía allí».

Y así era. El equipo colocó sensores en su cabeza para registrar la actividad eléctrica del cerebro mientras le pedían que abriera y cerrara la mano derecha. Luego, le instaron a dejar de hacerlo. Si bien la mano no se movió, los patrones de actividad cerebral registrados en el electroencefalograma difirieron entre ambas órdenes. Esas reacciones cerebrales sin duda indicaban que era consciente de que se le pedían cosas distintas. Al cabo de una semana, su cuerpo comenzó a obedecer al cerebro. Poco a poco empezó a despertar, con respuestas mínimas al principio. En un año se había recuperado por completo, sin secuelas físicas ni mentales importantes. Ahora trabaja de farmacéutica.

Nuestra protagonista se hallaba inmersa en un estado de «consciencia oculta» en que el cerebro reacciona a los estímulos del mundo exterior con cierto entendimiento, a pesar de que el cuerpo no lo haga. Una cifra tan elevada como entre el 15 y el 20 por ciento de los pacientes que parecen estar en coma o en otro estado arreactivo (con ausencia de respuesta) manifiestan estos signos internos de consciencia cuando se los examina con métodos avanzados de neuroimagen o de trazado de la actividad eléctrica cerebral. Muchas de esas técnicas han sido perfeccionadas en los últimos años y están cambiando nuestra comprensión del coma y de otros trastornos de la consciencia. La detección pronta de la consciencia oculta parece conceder más posibilidades de plena recuperación de la consciencia y la motricidad, como avalan nuestros estudios en la Universidad de Columbia. Estos hallazgos, que hace pocas décadas habrían desconcertado a la mayoría de los neurólogos y neurocientíficos, ponen de relieve la importancia de reconocer ese estado de consciencia oculta y poner a punto canales de comunicación con las personas sumidas en él.

EN SÍNTESIS

Algunas personas dadas por comatosas conservan resquicios de actividad cerebral consciente pese a mostrar una inmovilidad y arreactividad absolutas.

Denominado consciencia oculta, ese estado ha sido descubierto gracias a los avances en la exploración neurológica, como los EEG avanzados o la neurorresonancia funcional.

Con muchos escollos que superar aún en la detección y, sobre todo, en la comunicación con los afectados, su identificación debe ser una prioridad, dadas las mayores posibilidades de recuperación que otros trastornos de la consciencia.

La definición típica del paciente comatoso es la de una persona inconsciente, a la que no se puede despertar y que no muestra signos de consciencia ni de capacidad para interactuar con el entorno. El estado comatoso provocado por una lesión cerebral grave se distingue poco del sueño profundo, excepto por el hecho de que la mayoría de los enfermos no pueden respirar por sí mismos y necesitan un respirador con intubación endotraqueal.

Algunas personas creen que es fácil recuperarse del coma o, al contrario, que se trata de una muerte en vida. Ambas concepciones son erróneas. Es posible que su representación habitual en el cine y otros formatos sea, en parte, la culpable de ello. Uma Thurman, encarnando el personaje de la novia en *Kill Bill: Volumen 1*, se despierta de repente de un coma prolongado con aspecto de estar bien alimentada, pese a no tener sonda de alimentación, y recupera en cuestión de horas su fuerza. La realidad es mucho más compleja y viene acompañada de complicaciones médicas frecuentes, deterioro físico y un largo

camino de pequeños pasos adelante y muchos atrás. El paciente que sobrevive en coma a una lesión cerebral grave precisa una sonda para alimentarse, una traqueostomía para insertar en el cuello un tubo por el que respirar y semanas o meses de rehabilitación. La recuperación es variable e impredecible, hasta en aquellas personas que, como Maria, acaban recuperando la autonomía. Los retratos dramáticos del paciente comatoso también pecan de imprecisos, pues asumen siempre que está condenado a morir sin despertar jamás o a vivir con una incapacidad grave. En cambio, la recuperación de la consciencia, la posibilidad de comunicarse y la autonomía funcional son realidades plausibles en algunos pacientes, aunque haya transcurrido largo tiempo.

La percepción que la medicina tiene del coma y de la consciencia han ido evolucionando con el tiempo. En la década de 1960 los neurólogos y los neurocirujanos constataron que algunos pacientes en estado comatoso abrían los ojos, pero no mostraban ningún tipo de interacción con el entorno. Muchas de esas personas permanecían así hasta la muerte, lo que condujo a algunos médicos a creer que, una vez perdida, la consciencia era irrecuperable.

Con todo, en la década de 1990 empezaron a aparecer en la bibliografía médica casos de pacientes sumidos en un estado vegetativo «permanente» que acababan recuperando la consciencia. A diferencia del coma, en el estado vegetativo los ojos se abren y cierran, pero el paciente sigue sin reaccionar de forma voluntaria. Los casos de restablecimiento de ese estado impulsaron a los neurólogos intensivistas y a los especialistas en medicina rehabilitadora a definir clasificaciones más ajustadas, como el estado de consciencia mínima. Este se caracteriza por respuestas no verbales, como el seguimiento de objetos con la mirada o la reacción a peticiones de forma intermitente. El pronóstico, como dedujeron los médicos, estaba vinculado con esos estados: un paciente en estado vegetativo que evolucionaba al estado de consciencia mínima tenía más posibilidades de seguir mejorando.

Detectar y predecir con prontitud la recuperación de la consciencia en la unidad de cuidados intensivos suele ser una cuestión de vida o muerte. Las familias suelen tomar la decisión de mantener o cesar las medidas de soporte vital entre 10 y 14 días después del ingreso, el tiempo en que las intervenciones quirúrgicas se hacen necesarias para posibilitar la respiración y la alimentación a largo plazo. Y el diagnóstico de consciencia oculta influiría en las decisiones médicas que se toman sobre los objetivos de los cuidados, el tratamiento del dolor, el comportamiento de los médicos y los familiares junto al paciente, y el tratamiento de la depresión y la ansiedad.

¿A qué se parece la consciencia oculta para los médicos y la familia del enfermo? Es posible hacerse una idea a través del prisma del síndrome de enclaustramiento, en el que la persona mantiene un estado cognitivo normal o casi normal, pero es incapaz de ejecutar la mayoría de los movimientos. Los pacientes «enclaustrados» son el reflejo de las limitaciones derivadas de juzgar la consciencia, las capacidades cognitivas y las emociones simplemente a partir de la función motora. El término «enclaustramiento» fue acuñado en 1966 por los neurólogos Fred Plum y Jerome Posner en su monografía *The diagnosis of stupor and coma* («El diagnóstico del estupor y el coma»). Aludieron a la descripción de «cadáver con ojos vivos» que se hace de Noirtier De Villefort en *El conde de Montecristo*, el clásico escrito por Alejandro Dumas. En la práctica clínica, el paciente enclaustrado no mueve las extremidades, pero en muchos casos es capaz de mover los ojos arriba y abajo si se le pide. Algunos parpadean o hacen mínimos gestos faciales.

La experiencia de vivir en el estado de enclaustramiento fue narrada de forma conmovedora por Jean-Dominique Bauby, editor de la revista *Elle,* que, en 1995, sufrió un accidente cerebrovascular que bloqueó la transmisión de señales desde la corteza motora del cerebro a la médula espinal y las extremidades. Sin posibilidad de hablar ni de mover los miembros, empezó a comunicarse con su logopeda mediante los movimientos de un ojo y escribió unas memorias tituladas *La escafandra y la mariposa*. En ellas plasmó el miedo, la frustración y la esperanza que puede habitar en quienes padecen el síndrome de enclaustramiento. De forma impactante, algunas personas enclaustradas refieren una vida que merece la pena.

En el caso de la consciencia oculta, la inmovilidad externa es absoluta, mayor incluso que en el paciente «enclaustrado». Pero esto no entraña la ausencia de vida interior. En 2006, el neurocientífico Adrian M. Owen, que en la actualidad



KHOLOOD EID

A RAÍZ DE UNA LESIÓN CEREBRAL, Maria Mazurkevich quedó sumida en un coma aparente, pero las pruebas neurológicas revelaron que conservaba la consciencia y acabó recuperándose en un año.

ejerce en la Universidad de Ontario Occidental, y sus colaboradores examinaron a una joven que había sufrido un traumatismo craneoencefálico grave a la que se la consideraba en estado vegetativo. El equipo asistencial la sometió a una resonancia magnética nuclear (RMN) funcional, una técnica de exploración por imágenes que analiza el riego sanguíneo del cerebro para revelar las zonas activas. Durante la resonancia le pidieron que se imaginara jugando al tenis y luego recorriendo las habitaciones de su casa. Para sorpresa de Owen y sus colaboradores, mostró una activación cerebral equiparable a la registrada en los voluntarios sanos. Es más: los patrones de actividad cerebral cuando se la instaba a imaginarse jugando diferían de los mostrados en el caso de caminar por casa; es decir, era capaz de modificar la actividad cerebral.

La consciencia oculta se descubrió más tarde en afectados por diversos tipos de lesiones encefálicas. En 2017 se detectó en pacientes al parecer inconscientes, con daños cerebrales graves, que acababan de ingresar en la unidad de cuidados intensivos del Hospital General de Massachusetts, lo que apunta a que este estado puede surgir por lesiones muy recientes, no solo tras semanas de «ausencia». El diagnóstico exige recurrir a varias tareas conductuales, como

pedir al paciente que abra y cierre la mano, o que se imagine nadando, mientras se registra su reacción cerebral con un electroencefalograma o una RMN funcional. Estas respuestas han sido reproducidas por diversos grupos de investigación en todo el mundo a pesar de las diferencias en la metodología. El enfermo con consciencia oculta es capaz de alterar expresamente sus patrones cerebrales cuando se le pide que mueva una parte del cuerpo o se imagine practicando alguna actividad. Pero en lo relativo a los movimientos del cuerpo, no manifiesta signo alguno de poder cumplir ninguna indicación.

Ese estado de la existencia en que la función cognitiva excede a la expresión motora todavía se conoce muy poco, en parte porque tanto el electroencefalograma como la RMN adolecen de limitaciones. Es posible que ninguno de estos métodos detecte la actividad cerebral voluntaria en algunos pacientes que más tarde acabarán recobrando la consciencia. Los sedantes que por razones de seguridad y bienestar precisa la mayoría de los enfermos críticos también pueden interferir con ambas técnicas. Además, la RMN funcional exige una sala especializada, y el traslado de un paciente inestable desde la unidad de cuidados intensivos a ella puede entrañar riesgos. Otra dificultad más reside en que dicha técnica solo ofrece una instantánea del grado de consciencia del paciente en un lapso breve, pues no se presta a repetirla con frecuencia. El electroencefalograma sí se puede efectuar a menudo a pie de cama, tomando registros en momentos distintos, pero tampoco está exento de inconvenientes. Las lecturas pueden ser alteradas por las interferencias eléctricas que genera el resto de las máquinas de la unidad de cuidados intensivos, con la consiguiente aparición de artefactos ajenos a la realidad.

Ambos procedimientos precisan mejoras, pero las pruebas a favor de su utilidad son lo bastante sólidas como para que las guías médicas de EE. UU. (2018) y de Europa (2020) los recomienden para el diagnóstico de la consciencia oculta. La detección precoz de ese estado alterado de la consciencia poco después de una lesión predice la recuperación conductual de la consciencia, el restablecimiento funcional a largo plazo y la rapidez de la mejoría, como indican las investigaciones publicadas por nuestro grupo en 2019 (y confirmadas hace poco, en 2022). Siguiendo el impulso dado por estos estudios, varios científicos se reunieron en 2019 para lanzar la campaña *Curing coma* («Curar el coma»), una colaboración internacional encabezada por la Sociedad de Cuidados Neurocríticos para dirigir los recursos médicos y la atención pública a este trastorno, con el objetivo de poner a punto nuevos tratamientos que faciliten la recuperación de la consciencia.

Los neurólogos andan en busca de una prueba que permita reconocer a los pacientes que probablemente están sumidos en ese estado de consciencia oculta y que, por tanto, deberían ser sometidos a un examen avanzado con un electroencefalograma o una RMN funcional. Laboratorios de todo el mundo están trabajando para poner a punto ese tipo de métodos de cribado, pero los avances son lentos porque los mecanismos estructurales y funcionales que se hallan detrás de la consciencia oculta son inciertos, de modo que los médicos no saben exactamente lo que buscar. Los estudios recientes apuntan a que las causantes del estado podrían ser las lesiones cerebrales que desconectan el tálamo (un relé que transmite las señales motoras y sensoriales entre el cuerpo y el cerebro) de la corteza cerebral, donde residen las funciones cognitivas superiores. Con todo, es probable que el causante no sea un solo tipo de daño, sino que sea la conjunción de varias lesiones en diversos lugares lo que precipite la alteración motora pero posibilite al mismo tiempo la consciencia oculta. Otro obstáculo de cara a su detección es que los afectados por lesiones cerebrales graves presentan a menudo fluctuaciones en el grado de consciencia. Esos altibajos comportan que una única evaluación pueda pasar por alto signos importantes; quizá tengan que ser evaluados repetidas veces.

A la vista de los últimos descubrimientos sobre la presencia de la consciencia oculta, los investigadores están intentando restablecer la comunicación con los afectados por medio de interfaces cerebro-ordenador. Estos dispositivos suelen registrar la actividad eléctrica del cerebro mientras se pide al paciente que mueva el cursor de un ratón en la pantalla de un ordenador. Este «aprende» así a reconocer las señales fisiológicas generadas por los intentos del paciente de mover el cursor en las cuatro direcciones: izquierda, derecha, arriba y abajo. Una vez acabado el aprendizaje, los patrones cerebrales permiten al paciente tomar el control del cursor para señalar palabras o deletrear.

Las interfaces cerebro-ordenador serían perfectas como canal de comunicación con el mundo exterior para el paciente con consciencia oculta, pero encaran enormes dificultades, en especial si el enfermo sufre lesiones cerebrales graves. La capacidad de prestar atención a veces está alterada en esos casos, y el aprendizaje prolongado no suele ser factible. Además, el entorno agitado y ruidoso de la unidad de cuidados intensivos no es el más conveniente para ello. Sin ir más lejos, a pesar de que Maria Mazurkevich presentaba consciencia oculta con un ritmo de recuperación excelente, no pudo activar una de esas interfaces para comunicarse con el equipo asistencial ni tampoco con su familia.

La comunicación también es posible por medio de la RMN funcional. Hace unos años Martin Monti, psicólogo cognitivo de la Universidad de California en Los Ángeles, recurrió a ella para examinar la presencia de la consciencia oculta en un grupo de pacientes sin respuesta conductual. Quería comprobar si podían aprender a contestar «sí» o «no» a preguntas empleando distintos patrones de activación en la RMN funcional. Conseguirlo exigía una extraordinaria coordinación técnica, dado que las imágenes debían analizarse al instante. Al igual que Owen en 2006, Monti pidió a los pacientes que se imaginaran jugando al tenis o caminando por casa. La diferencia era que no buscaba solo la activación cerebral, sino comprobar si comprendían las preguntas lo suficiente como para contestarlas. Les dijo que pensaran en el tenis si la respuesta a la pregunta era «sí» y en caminar por casa si era «no». De ese modo identificó a un paciente del grupo que se comunicaba de forma fiable con esa estrategia de crear un patrón de actividad cerebral para las respuestas afirmativas y otro para las negativas. A pesar de las dudas planteadas acerca de si será factible un uso más generalizado, el estudio dejó claro que es posible la comunicación con pacientes sumidos en el estado de consciencia oculta.

Si se quiere mejorar la comunicación, los métodos de reconocimiento de esa situación cerebral deben ser aplicables en la cabecera del paciente. Varios grupos investigan técnicas avanzadas de EEG, pues este puede integrarse con menos complicación en la rutina de las unidades de cuidados intensivos. En cuanto a las interfaces cerebro-ordenador, es posible mejorar la exactitud del algoritmo encargado de descodificar los intentos del paciente por controlar el ordenador recurriendo a señales biológicas que complementen la actividad cerebral, como la frecuencia cardíaca.

Más allá de la premura de cuidar a los pacientes en estado crítico, el diagnóstico y la exploración de la consciencia oculta tienen el potencial de enseñarnos mucho sobre la mente humana. En la consciencia oculta, ese pilar de nuestra vivencia como seres humanos que es la consciencia está disociado de nuestra conducta. ¿Cuál es la vida mental interior de un paciente con consciencia oculta? Detectarla afecta en esencia a nuestra conceptualización del ser y de la autonomía del individuo. Las interfaces cerebro-ordenador todavía no permiten mantener conversaciones profundas y, hasta ahora, los afectados por ese estado que han recuperado la capacidad de comunicación no recuerdan la experiencia cuando se les ha preguntado. Sin ir más lejos, Maria no logra evocar ningún aspecto del tiempo que pasó en la unidad de cuidados intensivos sumida en el coma aparente. En pocas palabras, la vivencia sigue siendo en gran medida un misterio.

No hay duda, empero, del imperativo ético que urge al médico a buscar señales de consciencia en el paciente arreactivo con todas las técnicas y recursos a su alcance. Para la comunidad médica facilitar el acceso a ellas constituye un objetivo primordial, a la par que un reto, encabezado por la campaña *Curing coma*. Gracias a esas herramientas podemos vislumbrar un futuro en el que las personas con consciencia oculta dispondrán de una forma de expresarse por sí mismas.

Jan Claassen es profesor de neurología en la Universidad de Columbia, en Nueva York. Asimismo, ocupa el cargo de jefe de neurología y cuidados neurointensivos y dirige el Laboratorio de Trastornos de la Consciencia en el Hospital Presbiteriano de esa universidad.



Brian L. Edlow es profesor de neurología en la Escuela de Medicina de Harvard y neurólogo intensivista en el Hospital General de Massachusetts, donde dirige el Laboratorio de Neuroimagen Aplicada al Coma y la Consciencia, y es director adjunto del Centro de Neurotecnología y Neurorrecuperación.



EN NUESTRO ARCHIVO

Coma vigil. Vinzenz Schönfelder en *MyC*, n.º 31, 2008.
Ciegos con visión. Beatrice de Gelder en *IyC*, julio de 2010.
El pronóstico incierto del coma. Bernhard Fleischer en *MyC*, n.º 95, 2019.
Prueba olfativa para el estado de consciencia. La redacción en *MyC*, n.º 108, 2021.



LA ENERGÍA ULTRAVIOLETA de los láseres del Centro Nacional de Ignición de EE.UU. causa la implosión de una pequeña cápsula esférica situada en el interior de un cilindro de oro, lo que conduce a la fusión del hidrógeno contenido en la cápsula.

LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN LIVERMORE

ENERGÍA

LA IGNICIÓN DE LA FUSIÓN NUCLEAR

Jeff Tollefson y Elizabeth Gibney | Un laboratorio de fusión inducida por láser ha llevado a cabo la primera reacción que libera más energía que la necesaria para desencadenarla

Los científicos del laboratorio de fusión nuclear más grande del mundo han logrado por primera vez el fenómeno conocido como ignición: inducir una reacción de fusión que genera más energía de la que consume. Los expertos de todo el mundo se han entusiasmado con este logro del Centro Nacional de Ignición (NIF) de Estados Unidos, alcanzado el pasado 5 de diciembre. No obstante, advierten de que el objetivo de aprovechar la fusión nuclear (el proceso que tiene lugar en el Sol) para obtener una fuente de energía limpia y casi ilimitada en la Tierra aún queda muy lejos.

«Se trata de una hazaña increíble», sentencia Mark Herrmann, subdirector del programa de física fundamental de armas del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, donde se halla el NIF. El hito llega tras años de trabajo de diversos equipos en todo tipo de campos, desde los láseres y la óptica hasta los blancos y los modelos informáticos, detalla Herrmann. «Eso es, sin duda, lo que estamos celebrando.»

El NIF es uno de los principales laboratorios del programa de armas nucleares del Departamento de Energía de EE.UU, y se creó para estudiar las explosiones termonucleares. El plan inicial era conseguir la ignición antes de 2012, y el centro ha recibido críticas a causa de los retrasos y los sobrecostes. En agosto de 2021, los científicos del NIF anunciaron que habían empleado su láser de alta energía para provocar una reacción muy próxima a la ignición, aunque no consiguieron recrear el experimento en los meses posteriores. Al final, abandonaron la idea de reproducirlo y reconsideraron el diseño experimental, una decisión que acaba de dar sus frutos.

«Mucha gente lo veía imposible, pero quienes no perdimos la fe nos sentimos validados de algún modo», comparte Michael Campbell, exdirector del laboratorio de fusión de la Universidad de Rochester y uno de los primeros defensores del NIF cuando trabajaba en el Laboratorio Lawrence en Livermore. «Me estoy tomando una copa para celebrarlo.»

A continuación, desgranamos el último experimento del NIF y sus repercusiones para el campo de la fusión nuclear.

EN SÍNTESIS

Un laboratorio de EE.UU. ha alcanzado un hito en la fusión nuclear: una reacción que produjo más energía de la que se aportó al blanco.

Sin embargo, eso no significa que estemos cerca de generar energía limpia de fusión: los láseres empleados para provocar la reacción consumen mucha energía, así que el balance energético global fue muy negativo.

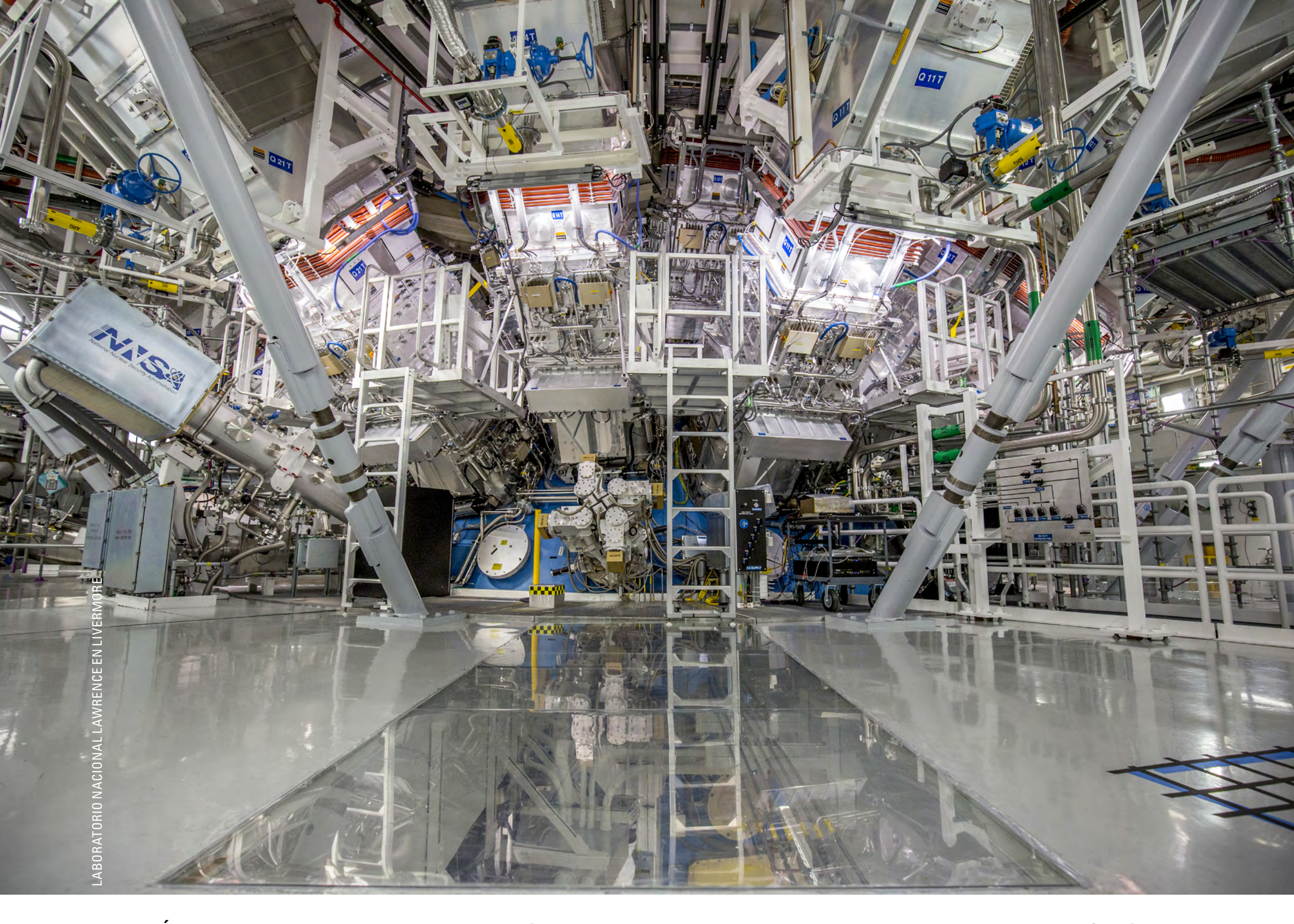
Otras dificultades técnicas ponen en duda que la fusión inducida por láser sea una forma viable de producir electricidad comercial, si bien el nuevo resultado podría impulsar ese método y otros enfoques basados en la fusión.

¿Qué se ha logrado?

El centro usó su conjunto de 192 láseres para inyectar 2,05 megajulios de energía en un cilindro de oro del tamaño de un guisante que contenía un blanco esférico con deuterio y tritio (dos isótopos del hidrógeno) congelados. El pulso de energía calentó esa cápsula a temperaturas que solo se dan en las estrellas y las armas termonucleares, haciendo que implosionara. Como resultado, los isótopos de hidrógeno se fusionaron para crear helio, lo cual liberó más energía y creó reacciones de fusión en cadena. El análisis del laboratorio indica que la reacción generó 3,15 megajulios, un 54 por ciento más que la energía aportada para desencadenarla y más del doble del récord anterior del NIF, de 1,3 megajulios.

«La fusión se empezó a investigar a principios de los años 50, y este es el primer experimento de laboratorio donde genera más energía de la que consume», explica Campbell. Sin embargo, aunque las reacciones de fusión produjeran más de 3 megajulios de energía (más de la que se aportó a la cápsula), los 192 láseres consumieron unos 322 megajulios en el proceso. Así pues, el balance energético global es muy negativo. A pesar de ello, se considera que hubo ignición, dado que este criterio de referencia solo tiene en cuenta la relación entre la energía que recibe el blanco y la que libera la reacción.

«Representa un gran avance, pero el NIF no es un instrumento centrado en la energía de fusión», subraya Dave Hammer, ingeniero nuclear de la Universidad Cornell. Herrmann lo admite, al señalar que todavía queda mucho por andar para la energía de fusión inducida por láser. «El NIF no se diseñó para ser eficiente», apunta. «Queríamos construir el láser más grande posible para llevar a cabo un programa de investigación [nuclear] que obtuviera gran cantidad de datos.»



LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN LIVERMORE

CÁMARA del Centro Nacional de Ignición de EE.UU. donde se llevan a cabo los experimentos de fusión nuclear inducida por láser. El pasado 5 de diciembre, los 192 láseres del laboratorio inyectaron más de dos millones de julios de energía ultravioleta en una pequeña cápsula con combustible para lograr la ignición.

Los científicos del NIF hicieron muchos cambios antes del último disparo del láser, basados en parte en el análisis y los modelos informáticos de los experimentos del año pasado. Aparte de aumentar la intensidad del láser en torno a un 8 por ciento, crearon un blanco con menos imperfecciones y adaptado al modo en que se inyectaba la energía del láser, a fin de obtener una implosión más esférica. Los investigadores eran conscientes de que se hallaban al borde de la ignición y, según Herrmann, en esas condiciones «cualquier pequeña modificación puede suponer una gran diferencia».

¿Por qué es relevante este resultado?

De entrada, el resultado demuestra que es posible lograr la ignición, y muchos científicos lo consideran un hito en este campo. Pero también tiene una importancia especial para el NIF. El centro se creó para ayudar a los expertos en armas nucleares a estudiar las enormes cantidades de calor y presión implicadas en las explosiones, algo que solo se puede conseguir si se generan reacciones de fusión de alto rendimiento.

Ha costado más de una década, «pero se merecen un aplauso por alcanzar su objetivo», valora Stephen Bodner, físico que antes dirigía el programa de fusión inducida por láser del Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU. Para Bodner, la gran pregunta es cuál será el siguiente paso del Departamento de Energía, apostar con más fuerza por la investigación armamentística que se desarrolla en el NIF o pasar a centrarse en la energía de fusión.

¿Nos acerca a la energía de fusión?

Los recientes resultados han renovado las esperanzas de un futuro alimentado por la energía limpia de la fusión, pero los expertos alertan de que aún queda un largo camino por recorrer.

El NIF no se creó pensando en la producción comercial de energía de fusión, y muchos investigadores dudan de que la fusión inducida por láser sea el método que acabe impulsándola. No

obstante, Campbell piensa que este hito podría aumentar la confianza en el potencial de la técnica basada en láseres y abrir la puerta a un programa centrado en sus aplicaciones energéticas. «[Este resultado] es imprescindible para tener credibilidad a la hora de vender un programa energético», argumenta.

Kim Budil, directora del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, se refirió al hito como una prueba de concepto. «No quiero dar la impresión de que vamos a conectar el NIF a la red eléctrica: nada más lejos de la realidad», aclaró en una rueda de prensa. «Pero esta es la primera piedra para crear un programa de energía de fusión por confinamiento inercial.»

Hay muchos otros experimentos de fusión en el mundo que intentan conseguir la fusión para aplicaciones energéticas empleando distintos enfoques. Sin embargo, aún existen retos técnicos, como diseñar y construir plantas que extraigan el calor producido por la reacción y lo usen para generar cantidades considerables de energía que pueda transformarse en electricidad útil.

«Aunque es una noticia positiva, estamos lejos de la ganancia energética necesaria para generar electricidad», puntualiza Tony Roulstone, experto en energía nuclear de la Universidad de Cambridge. Sin embargo, «los experimentos del NIF sin duda son valiosos en el camino hacia la producción comercial de energía de fusión», asegura Anne White, física de plasma del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

¿Cuáles son los siguientes pasos?

Para demostrar que el tipo de fusión que se estudia en el NIF es una forma viable de producir energía, el rendimiento (la relación entre la energía liberada por la reacción y la empleada para generar los pulsos láser) tiene que crecer, por lo menos, en dos órdenes de magnitud.

También habrá que aumentar sobremanera la velocidad a la que se producen los pulsos láser y la rapidez a la que se puede vaciar la cámara donde se encuentra el blanco, con el fin de dejarla lista para otra implosión, explica Tim Luce, director científico y de operaciones del reactor de fusión nuclear ITER, que se halla en construcción en Francia. «Lograr producir suficientes eventos que generen energía de fusión con un rendimiento constante sería un hito fundamental», opina White.

El proyecto ITER (una colaboración de más de 20.000 millones de euros entre China, la Unión Europea, la India, Japón, Corea, Rusia y Estados Unidos) pretende conseguir una fusión autosostenida, es decir, que la energía generada por la fusión produzca más fusión, usando una técnica diferente al «confinamiento inercial» del NIF. ITER mantendrá un plasma de deuterio y tritio confinado en una cámara de vacío toroidal (denominada «tokamak»), y lo calentará hasta que se fusionen los núcleos. Cuando el reactor comience a operar en 2035, se espera alcanzar una fase «ardiente», explica Luce, «en la que las reacciones de fusión constituyan la principal fuente de calor».

¿Cómo afecta a otros experimentos?

ITER y el NIF utilizan dos técnicas de fusión de entre las muchas que se estudian en el mundo, las cuales incluyen el confinamiento magnético del plasma (empleado en tokamaks y aceleradores estelares, o *stellarators*), el confinamiento inercial (usado por el NIF) y un enfoque híbrido. La técnica requerida para generar electricidad a partir de la fusión es casi independiente del enfoque, apunta White, y este último hito no tiene por qué llevar a los investigadores a abandonar o combinar sus métodos.

Los retos técnicos a los que se enfrenta el NIF son diferentes a los del ITER y otros centros. Sin embargo, esta hazaña simbólica podría tener efectos de largo alcance. «Un resultado así hará que aumente el interés por el avance de todos los tipos de fusión, así que, en general, debería tener efectos positivos en la investigación de la fusión nuclear», concluye Luce.

Jeff Tollefson es periodista científico especializado en clima, energía y medioambiente.

Elizabeth Gibney es periodista de la revista *Nature*.

Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por *Investigación y Ciencia* con el permiso de Nature Research Group© 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las dificultades de la fusión nuclear. Michael Moyer en *IyC*, mayo de 2010.
La fusión alternativa. W. Wayt Gibbs en *IyC*, enero de 2017.
Más cerca de la fusión. Clara Moskowitz en *IyC*, abril de 2021.
Un gran avance en la fusión nuclear inducida por láser. Jan Dönges en www.investigacionyciencia.es, 6 de septiembre de 2021.
¿Energía de fusión? Todavía lejos. Ángel Garcimartín Montero en el blog *Materia blanda*, 30 de diciembre de 2022.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

NEUROCONTESTATARIOS

Crecen las voces que cuestionan las bases filosóficas de las neurociencias

Moisés Pérez Marcos

El avance de las neurociencias posee una relevancia antropológica incuestionable. Está claro que los conocimientos que obtenemos de ese campo interdisciplinar de estudio son muy valiosos para nuestra comprensión del ser humano. Quizás en las últimas décadas solo la genética ha suscitado tantas esperanzas de ser la ciencia que, por fin, clarificaría distintos aspectos de la naturaleza humana. Prueba de ello es el optimismo reinante respecto a las neurociencias, no solo entre muchos investigadores, sino también a un nivel divulgativo o popular. No es infrecuente la aparición en la prensa de titulares más bien sensacionalistas, que dan a entender que los neurocientíficos han conseguido explicar cualquiera de las características tenidas por típicas del ser humano, y todo ello sobre la base del desciframiento de los correlatos neuronales de las mismas o de los mecanismos neurofisiológicos subyacentes.

Pero, lo mismo que la genética en su día, las neurociencias se enfrentan a numerosos problemas, técnicos y conceptuales —algo normal en toda disciplina viva—. En los últimos años se han multiplicado las publicaciones sobre lo que podemos denominar filosofía de las neurociencias, que tendría por objeto el estudio de los supuestos filosóficos de estas, pero también el examen de sus repercusiones antropológicas. De entre todos esos «neurofilósofos» hay un grupo, cada vez más numeroso, aunque aún minoritario, que podemos englobar bajo el epígrafe de «neurocontestatarios», no porque se opongan a las neurociencias, sino porque consideran que algunos de los supuestos filosóficos atribuidos a la actual neurociencia están poco justificados, son endebles o, sencillamente, erróneos.

Uno de estos supuestos consiste en la identificación del yo con el cerebro. Fernando Vidal, profesor de investigación de la Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA), ha acuñado el concepto de «cerebralidad» (*brainhood*) para designar la comprensión moderna del sujeto humano como aquel que es su cerebro, concepción que, obviamente, conduce a una perspectiva «neurocéntrica». La creación del sujeto cerebral, sin embargo, no se debe a las neurociencias contemporáneas ni a los conocimientos que estas aportan, sino que procede de las nociones filosóficas de persona e identidad personal propias de la Modernidad.

De hecho, las neurociencias no confirman empíricamente la cerebralización, aunque es cierto que esta se apoya en ellas y las condiciona. La reducción del sujeto a su cerebro sería, desde esta perspectiva, un supuesto filosófico que estaría condicionando fuertemente, no solo la interpretación de los conocimientos de las neurociencias, sino también el diseño y la ejecución de los experimentos. La cerebralidad no es una consecuencia inevitable de las neurociencias. Por el bien de estas, más vale que nos desprendamos de ese supuesto filosófico que las hará encallar o meterse en un callejón sin salida.

El filósofo de Oxford Peter Hacker y el neurocientífico del Instituto de Investigación del Cerebro y la Mente en Sídney Max Bennett han



ISTOCK/JOLYGON

colaborado durante años en la elaboración de una profunda revisión de las bases conceptuales sobre las que se asienta la neurociencia contemporánea. Su postura, que claramente puede calificarse de heterodoxa, se opone al consenso neurocientífico actualmente establecido, hasta el punto de afirmar que buena parte de los experimentos de las neurociencias y de sus interpretaciones son, desde el punto de vista conceptual, sinsentidos.

Las neurociencias son una rama de la ciencia floreciente, y muy relevante, pero no están libres de los errores teóricos que sufrieron otras disciplinas en la historia de la ciencia. Un mal uso de conceptos psicológicos como percepción, memoria, imagen mental, emoción o volición, hace que las investigaciones empíricas resulten mal planteadas o erróneamente interpretadas. Una vez clarificado y comprendido el concepto geográfico de polo, tiene sentido que llevemos a cabo una expedición para llegar al Polo Norte, pero es un sinsentido plantear siquiera que podamos hacerla al Polo Este. De forma análoga, cuando comprendemos y clarificamos los conceptos psicológicos referidos, nos damos cuenta de que algunos experimentos neurocientíficos, o algunas interpretaciones de los mismos, están intentando llegar al Polo Este.

Descartes distinguió entre el cuerpo y la mente, y atribuyó las capacidades psicológicas humanas al alma. La primera generación de neurocientíficos (Charles Sherrington, John Eccles o Wilder Penfield) permanecieron fieles a una u otra forma de dualismo. Sus sucesores, la segunda gran generación de neurocientíficos, rechazaron el dualismo, según Bennett y Hacker con razón, y trasladaron las habilidades psicológicas al cerebro. Pero esto último constituye un error conceptual. El filósofo Ludwig Wittgenstein escribió que «solo del ser humano y de lo que se parece a un ser humano (se comporta como tal) se puede decir: tiene sensaciones; ve, es ciego; oye, es sordo; es consciente o inconsciente». Inspirados tanto en esta frase como en el espíritu de la filosofía de Wittgenstein, es decir, en el análisis del uso que hacemos de las palabras, Bennett y Hacker defienden que el cerebro no es un sujeto lógicamente apropiado para los predicados psicológicos: el cerebro no ve ni es ciego, no oye ni es sordo, no toma decisiones ni es indeciso, no es consciente ni inconsciente. Sabemos qué significa que una persona vea algo, o tome una decisión, pero no tenemos ni la más remota idea de qué puede significar que un cerebro vea algo o tome decisiones. Las reglas que nos damos para el uso del término *ver* en el caso humano no tienen nada que ver con las que pretenden algunos en el caso del cerebro. Afirmar que el cerebro ve tiene tan poco sentido como afirmar que nos acercamos al Polo Este de la Tierra.

Bennett y Hacker analizan minuciosamente la obra de los más destacados neurocientíficos contemporáneos (y de algunos filósofos) para mostrar que este tipo de errores están muy extendidos, y que son algo más que una mera forma de hablar o una metáfora inocua. Prueba de ello es que habitualmente se pasa de forma injustificada (no sustentada por la experiencia) de un modo no semántico de comprender los conceptos psicológicos a uno que sí lo es.

Cuando se dice, por ejemplo, que el cerebro elabora representaciones de la realidad con los datos percibidos por los sentidos, los neurocientíficos solo pueden estar refiriéndose a relaciones causales (no semánticas). Una representación para un cerebro, llamémosla representación*, es, desde el punto de vista de las neurociencias, un conjunto de procesos neurofisiológicos muy complejos relacionados causalmente entre sí. O sea, un *input* sensorial que llega al cerebro desde, por ejemplo, el ojo, causará cambios en ciertas zonas del propio cerebro; pero no está ni mucho menos claro que dichos cambios constituyan una representación del dato sensorial o de la realidad a la que este se refiere. Lo que normalmente llamamos representación, el concepto semántico de la misma, es un símbolo o sistema de símbolos con una sintaxis y un significado determinado por convención que utilizan las personas. Decir que la representación* (causal) es una representación (semántica) no solo no ayuda a comprender las cosas, sino que las confunde aún más y hace que terminemos atribuyendo

al cerebro capacidades que pertenecen solo a la persona. No se trata de un uso metafórico inocente, sino de un grave error conceptual que podría conducir a las neurociencias al sinsentido. Este tipo de errores son evitables, y por eso es tan necesario que neurocientíficos y filósofos trabajen juntos en la clarificación conceptual, en el diseño de los experimentos y en su interpretación.

El cerebro no ve ni es ciego, no oye ni es sordo, no toma decisiones ni es indeciso, no es consciente ni inconsciente

A partir de la década de los años 90 del siglo xx, como crítica al modelo computacional de la mente, surgieron las perspectivas corporizada, extendida y enactiva que, según algunos, vendrían a configurar un nuevo marco conceptual para las ciencias cognitivas y también ofrecerían recursos para elaborar una neurociencia que vaya más allá de la cerebralidad. La mente es corporizada (*embodied*) porque pensamos desde el cuerpo en su conjunto, no solo desde el cerebro. Se recupera aquí la reflexión filosófica de autores como Maurice Merleau-Ponty. La cognición se comprende no como un asunto de representaciones dentro del cerebro, sino como un modo de relación corporal entre el cognoscente y el mundo. Los movimientos corporales son, en rigor, una forma de conocimiento, y se puede incluso hablar de «pensar con movimientos», como ha defendido la filósofa de la Universidad de Oregón Maxine Sheets-Johnstone. Según el filósofo Shaun Gallagher, de la Universidad de Memphis, la mente es moldeada por las estructuras corporales, por lo que no puede entenderse sin el cuerpo.

La expresión «mente extendida» (*extended mind*) fue acuñada por el filósofo Andy Clark, de la Universidad de Sussex, y su colega de la Universidad de Nueva York David Chalmers. La tesis de la mente extendida viene a decir que no todos los actos mentales ni todos los estados mentales están localizados en el interior de la persona que cree, desea, espera, teme, etcétera. Algunos estados y actos mentales estarían localizados en el exterior de los límites biológicos de los individuos que los poseen o, al menos, estarían parcialmente constituidos por factores que se encuentran fuera de esos límites. Hay estructuras del ambiente cuya manipulación o transformación forma parte, propiamente hablando, del acto de la cognición. El uso de un bastón, por ejemplo, conduce a un cambio en el esquema mental que la persona que lo utiliza asiduamente posee de su propio cuerpo (gracias a la plasticidad neuronal), y le permite realizar movimientos que sin él no serían posibles. Del mismo modo, otros artefactos culturales (como el lápiz y el papel en la resolución de problemas matemáticos, un mapa, un libro o un ordenador) pertenecen con propiedad a la cognición. El concepto de la cognición extendida hace que no podamos fijarnos solo en el cerebro a la hora de explicar qué es conocer, sino que tengamos que acudir a las complejas relaciones entre el cerebro, el resto del organismo y los instrumentos que este utiliza.

También la concepción enactiva rechaza que el cerebro sea el único lugar en el que debe estudiarse la mente. Muchos datan el origen de esta concepción en la publicación de *The embodied mind: Cognitive science and human experience* (1991), del filósofo y biólogo chileno Francisco Varela, el filósofo de la Universidad de la Columbia Británica Evan Thompson y la psicóloga Eleanor Rosch, de la Universidad de California en Berkeley. El neologismo «enacción» (del inglés *enact*, «representar (una obra)» o «actuar») se referiría a la cognición comprendida como algo que hay que poner por obra, que emerge en la acción. El conocimiento, desde esta perspectiva, no es necesariamente teórico, y se adquiere en la práctica, en la relación que el cuerpo entabla con el entorno, gracias al sentido común. Aprender a andar en bicicleta, por ejemplo, no exige el estudio del equilibrio desde un punto de vista conceptual, sino la práctica repetida de unas acciones corporales que van progresivamente mejorando la habilidad hasta llegar a un dominio suficiente. Más que como un conocimiento teórico «de

algo», la enacción se parece más a una disposición o a un «conocimiento práctico», basado en la acumulación de experiencias a partir de un gran número de casos.

La esencia de la cognición, entonces, no hace referencia a un conjunto de reglas cada vez más elaboradas para el procesamiento de la información (como quiere la perspectiva cognitivista clásica), sino a un «saber cómo», no representacional, que acopla la acción del cognoscente y el entorno. Varela, Thompson y Rosch encuentran antecedentes de esta idea en la hermenéutica filosófica de Martin Heidegger y su discípulo Hans-George Gadamer: enactuar sería interpretar o hacer emerger el sentido a partir de un trasfondo de comprensión. El conocimiento, entonces, depende del hecho de que estamos en un mundo inseparable de nuestro cuerpo, nuestro lenguaje y nuestra historia social.

El concepto de la mente corporizada, extendida y enactiva, supone, entonces, un desafío para la perspectiva cerebrocéntrica. El filósofo de Berkeley Alva Nöe ha criticado fuertemente el paradigma actual de las neurociencias, que denomina sarcásticamente «digestivo»: la mente o la consciencia no pueden explicarse acudiendo a algo que pasa dentro de nosotros, como si fuese la digestión. Hay que librarse del «microenfoque neuronal interno» y ampliar la perspectiva hasta un enfoque holístico que tenga en cuenta que la mente se parece más a una danza que se lleva a cabo con el mundo y con los demás, que a un conjunto de procesos neurofisiológicos que acontecen en el cerebro. Hemos de considerar la consciencia como algo que nosotros hacemos, como una especie de actividad vital. No debemos mirar hacia dentro, sino mirar hacia las maneras en que cada uno de los vivientes lleva a cabo el proceso de vivir en el mundo, con el mundo y en respuesta al mundo que nos rodea. No somos nuestro cerebro, sino que el cerebro es una parte de lo que somos. Es obvio que necesitamos nuestro cerebro, y hay que estudiarlo desde una perspectiva neurofisiológica. Pero eso no basta. Hemos de ampliar la perspectiva para comprender la relación dinámica entre el ser vivo en su conjunto y el entorno.

La perspectiva de Nöe y de otros enactivistas no se mantiene solo en el plano estrictamente filosófico, sino que se abre a la posibilidad de una investigación empírica. Un buen ejemplo de ello lo tenemos en la obra del neurocientífico, psiquiatra y filósofo de la Universidad de Ottawa Georg Northoff, cuyo trabajo experimental parte de un concepto no reduccionista de la neurociencia que tiene en cuenta los aspectos mencionados.

Hay más ejemplos de pensadores neurocontestatarios (Raymond Tallis, Mary Midgley, Paolo Legrenzi, Carlo Umiltà y Markus Gabriel, entre otros), pero con lo visto basta para concluir que, según ellos, las neurociencias, precisamente por ser muy relevantes, merecen un examen atento y crítico en sus bases filosóficas. Quizá la falta de esa crítica explique, en parte, por qué nos está costando tanto elaborar un marco conceptual en el que los nuevos descubrimientos tengan sentido. Sin el examen de los supuestos filosóficos de las neurociencias, la investigación empírica estará desorientada y seremos incapaces de evaluar las consecuencias reales que el conocimiento del cerebro y del sistema nervioso tiene para nuestra comprensión del ser humano. Dejemos de buscar el Polo Este.

Moisés Pérez Marcos es profesor en la Universidad Católica de Valencia e investigador posdoctoral en la Universidad de Oxford



PARA SABER MÁS

Fuera de la cabeza. Por qué no somos el cerebro y otras lecciones de la biología de la consciencia. Alva Nöe. Kairós, 2010.

History of Cognitive Neuroscience. Maxwell Richard Bennett y Peter Hacker. Blackwell, 2013.

The Embodied Mind. Francisco Varela, Evan Thompson y Eleanor Rosch. The MIT Press, 2016.

¿Somos nuestro cerebro? La construcción del sujeto cerebral. Fernando Vidal y Francisco Ortega. Alianza, 2021.

Philosophical Foundations of Neuroscience. Maxwell Richard Bennett y Peter Hacker. Wiley Blackwell, 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nueve ideas para mejorar la neurociencia. Isabelle Bareither, Felix Hasler y Anna Strasser en *MyC*, n.º 73, 2015.

La neurointerdisciplinariedad: ¿realidad fecunda o publicidad engañosa? Fernando Vidal en *MyC*, n.º 73, 2015.

Neurociencia: evitar el desengaño. Alfredo Marcos en *IyC* marzo de 2016.

¿Está la neurociencia limitada por las herramientas o por las ideas? Partha Mitra en *IyC*, julio de 2018.

FORO CIENTÍFICO

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL AÚN NO ES DEL TODO FIABLE

Incluso los sistemas de IA más novedosos que están en boca de todos se ven lastrados por los mismos problemas de siempre

Gary Marcus

Al ciudadano de a pie le debe de parecer que el campo de la inteligencia artificial avanza a pasos agigantados. Según diversos medios y comunicados de prensa demasiado efusivos, el sistema DALL-E 2 de OpenAI es capaz de crear imágenes espectaculares a partir de cualquier texto; otro algoritmo de OpenAI denominado GPT-3 puede hablar de casi cualquier tema e incluso escribir sobre sí mismo; y un sistema apodado Gato, lanzado en mayo del año pasado por DeepMind, una división de Alphabet, desempeñó bien todas las tareas que la empresa le encomendó. Uno de los altos ejecutivos de DeepMind llegó a jactarse de que, en lo concerniente a la búsqueda de una IA con la flexibilidad y los recursos e inventiva de la inteligencia humana, lo que se conoce como inteligencia general artificial (IAG), «el juego ha terminado».

No nos dejemos engañar. Quizás algún día las máquinas sean tan inteligentes como las personas, o incluso más, pero el juego dista



MICHAEL GLENWOOD

mucho de haber acabado. Aún queda pendiente una cantidad inmensa de trabajo antes de que las máquinas sean verdaderamente capaces de razonar y comprender el mundo que las rodea. Lo que necesitamos ahora mismo son menos poses y más investigación básica.

Ello no implica que no se hayan realizado progresos —las imágenes sintéticas parecen cada vez más realistas y el reconocimiento del habla funciona a menudo en entornos ruidosos—, pero es probable que aún falten décadas para desarrollar una IA de propósito general que logre entender, a nivel humano, el verdadero significado de los artículos y los vídeos, o lidiar con obstáculos e interrupciones inesperadas. El campo se halla atascado justo en las mismas dificultades que los científicos académicos (entre los que me incluyo) llevan años señalando: conseguir una IA que sea fiable y capaz de afrontar circunstancias inusuales.

Considérese el reciente y célebre Gato y los pies de foto con los que describió la imagen de un jugador de béisbol lanzando una pelota de béisbol (*en esta página*). Estas fueron las tres mejores conjeturas del sistema:

Un jugador de béisbol lanzando una pelota en el montículo de un campo de béisbol.

Un hombre lanzando una pelota a un lanzador en un campo de béisbol.

Un jugador de béisbol bateando y un receptor en la caja durante un partido de béisbol.

La primera respuesta es correcta, pero las otras dos corresponden a elucubraciones sobre otros jugadores que no aparecen en la foto. El sistema desconoce qué muestra esta en realidad, más allá de las aproximaciones que obtiene a partir de las similitudes estadísticas con otras imágenes. Cualquier aficionado al béisbol reconocería que se trata de un lanzador que acaba de lanzar una pelota y no al revés. Y aunque cabe esperar que un receptor y un bateador se sitúen cerca uno del otro, estos claramente no aparecen en la escena.

Asimismo, DALL-E 2 no logró distinguir entre la orden de generar la imagen de un cubo rojo encima de uno azul y la de generar la imagen de un cubo azul encima de uno rojo. Y un sistema lanzado en mayo del año pasado no supo diferenciar entre un astronauta montado en un caballo y un caballo montado en un astronauta (*página siguiente*).

Cuando los sistemas de creación de imágenes como DALL-E 2 se equivocan, el resultado puede ser divertido. Sin embargo, en ocasiones los errores cometidos por una IA pueden acarrear graves consecuencias. Hace poco, un vehículo Tesla en piloto automático que circulaba directamente hacia un obrero que levantaba una señal de *stop* en medio de la carretera solo aminoró la velocidad cuando intervino el conductor humano. El sistema era capaz de reconocer a las personas solas (que es como aparecían en los datos de entrenamiento) y las señales de *stop* en sus ubicaciones habituales (que es como aparecían en las imágenes de entrenamiento), pero no frenó cuando tuvo que enfrentarse a la combinación desconocida de ambos, que situaba la señal de *stop* en una posición nueva e inusual.



Por desgracia, el hecho de que estos sistemas continúen siendo poco fiables y tengan dificultades con circunstancias novedosas suele estar oculto en la letra pequeña. Gato, por ejemplo, desempeñaba bien todas las tareas referidas por DeepMind, pero rara vez igualaba a otros sistemas coetáneos. GPT-3 elabora a menudo una prosa fluida, pero falla en operaciones aritméticas básicas y tiene tan poco contacto con la realidad que es propenso a escribir frases del tipo: «Algunos expertos creen que el acto de comerse un calcetín ayuda al cerebro a salir de su estado alterado como resultado de la meditación». Ahora bien, si se echa un vistazo rápido a los titulares recientes, ninguno de estos problemas parece mencionarse.

La subtrama aquí radica en que los principales grupos de investigación en IA ya no se encuentran en el ámbito académico, donde la revisión por pares constituye un bien preciado, sino en las corporaciones. Y las empresas, a

diferencia de las universidades, carecen de incentivos para jugar limpio. En lugar de someter sus ostentosos trabajos al escrutinio académico, optan por divulgarlos mediante comunicados de prensa, seduciendo a los periodistas y eludiendo el proceso de revisión por pares. Solo conocemos lo que las empresas quieren que conozcamos.

En la industria informática, existe una palabra para definir este tipo de estrategia: *demoware*; es decir, programas diseñados para que resulten atractivos en sus versiones de prueba, pero que no necesariamente son eficaces cuando se aplican a situaciones de la vida real. A menudo, estos programas se convierten en *vaporware*, programas que se anuncian con el fin de causar impacto y asombro para desalentar a los competidores, pero que nunca llegan al mercado.

No obstante, tarde o temprano se recoge lo que se siembra. La fusión fría parecía una alternativa extraordinaria, pero uno no puede comprarse un reactor en el centro comercial. Es probable que la IA sufra una fase de expectativas desinfladas. Se han publicitado demasiados productos, como los vehículos autónomos, los radiólogos automatizados y los agentes digitales multipropósito, que nunca han llegado a materializarse. Por el momento, las promesas siguen atrayendo inversores —¿a quién no le gustaría tener un coche autoconducido?—. Pero si no se resuelven los problemas relacionados con la falta de fiabilidad y la incapacidad para lidiar con casos atípicos, cesará el flujo de dinero. Quizá logremos avances sólidos en la traducción automática y en el reconocimiento del habla y de objetos, pero buena parte de todo el despliegue publicitario prematuro se quedará en humo. En lugar de ciudades «inteligentes» y una sanidad «democratizada», tendremos vídeos manipulados nocivos y redes que consumen energía y emiten cantidades ingentes de carbono.

El aprendizaje profundo, pese a haber mejorado la capacidad de las máquinas para reconocer patrones en los datos, presenta tres grandes defectos: irónicamente, los patrones aprendidos son superficiales, no conceptuales; cuesta interpretar los resultados que crea; y estos, además, son difíciles de utilizar en el contexto de otros procesos, como la memoria y el razonamiento. Como indica el científico computacional de la Universidad Harvard Les Valiant, «el principal reto consiste en unificar la formulación del aprendizaje y el razonamiento». No se sabrá cómo actuar frente a una persona con una señal de *stop* si no se entiende qué es la señal.









MICHAEL GLENWOOD

Por ahora nos hallamos atrapados en un «mínimo local», en el cual las empresas persiguen puntos de referencia en vez de principios fundamentales. La práctica actual de la ingeniería camina muy por delante de las competencias científicas: estos departamentos se centran en conseguir pequeñas mejoras con las herramientas poco comprendidas de las que disponen, en vez de desarrollar nuevas tecnologías con una base teórica más clara. Por eso la investigación básica continúa siendo crucial. Que gran parte de la comunidad investigadora en inteligencia artificial (como quienes gritan «fin del juego») ni siquiera sea capaz de verlo resulta desgarrador.

Imagínese que una entidad extraterrestre estudiara toda la interacción humana mirando solo las sombras en el suelo y se percatara de que unas son más largas que otras y de que todas desaparecen por la noche. Quizás incluso se daría cuenta de que las sombras crecen y decrecen regularmente a intervalos periódicos, pero sin fijarse nunca en el sol ni reconocer el mundo tridimensional de arriba.

Es hora de que los investigadores en inteligencia artificial dejen de contemplar solo las demostraciones ostentosas dirigidas a los medios de comunicación y se planteen cuestiones esenciales acerca de cómo construir sistemas que sean capaces de aprender y de razonar al mismo tiempo.

Gary Marcus es científico, escritor y empresario. Su libro más reciente, escrito en colaboración con Ernest Davis, es *Rebooting AI* (Vintage, 2019).



NANOESPONJAS AROMÁTICAS Y SALUDABLES

El uso de redes de ciclodextrinas permite el desarrollo de productos alimentarios con mejor aroma y fármacos con nuevas propiedades

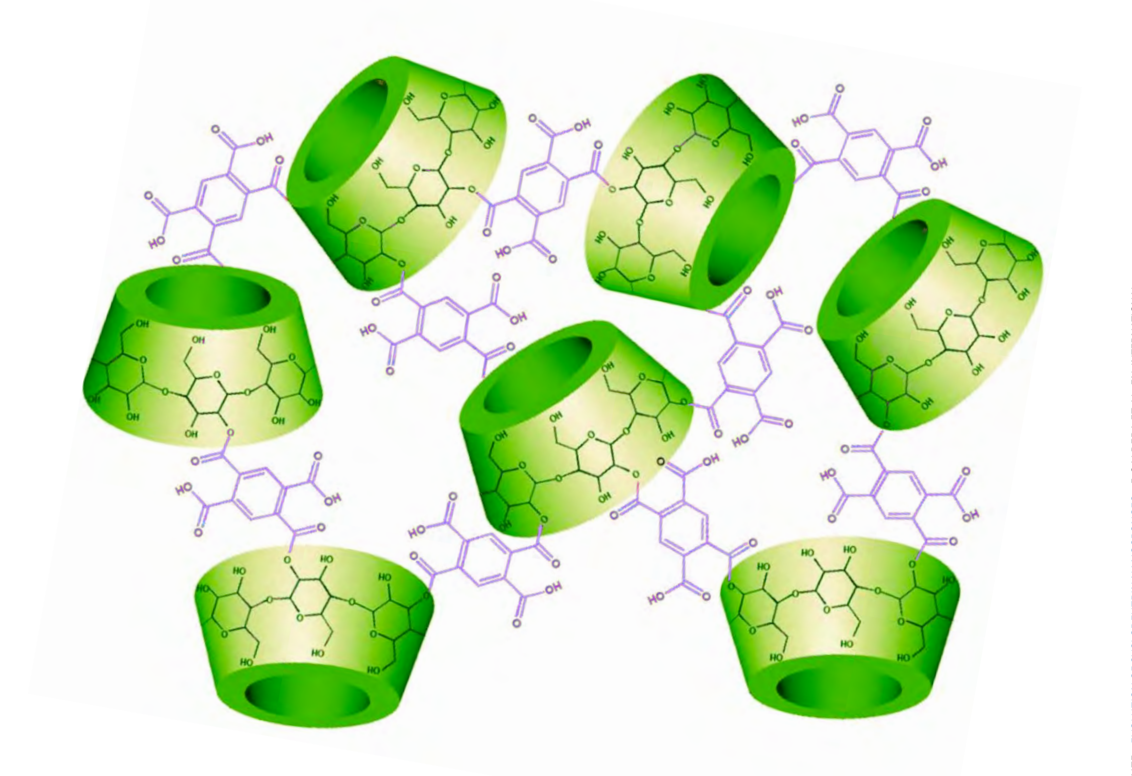
José Manuel López Nicolás

Uno de los principales objetivos de la industria alimentaria es obtener alimentos con un aroma agradable. Sin embargo, hay varios problemas que le dificultan alcanzar dicha meta. Por un lado, existen moléculas presentes de forma natural en alimentos que desprenden un aroma desagradable y que son difícilmente eliminables (hallamos ejemplos en algunos aldehídos, cetonas y ácidos de 6 y 9 átomos de carbono que se producen en el procesado de alimentos ricos en ácidos grasos poliinsaturados como el salmón, la caballa, el arenque, las nueces o el aceite de soja). Por otro lado, la alta volatilidad de numerosas moléculas presentes en los alimentos provoca que su potencial aromático se pierda rápidamente. Además, muchos ingredientes que presentan buen aroma son hidrófobos (no se mezclan bien con el agua), lo que constituye un hándicap a la hora de enriquecer alimentos de naturaleza hidrófila (como, por ejemplo, zumos) para mejorar su perfil sensorial.

Una de las soluciones que se han desarrollado para resolver estos problemas es la encapsulación molecular, una técnica que permite introducir ciertas sustancias bioactivas (denominadas moléculas huésped) en un agente encapsulante. Existen varios métodos de encapsulación de aromas; el escoger uno u otro depende de las propiedades físicoquímicas del agente encapsulante, del tamaño y de la solubilidad de la molécula huésped, del mecanismo de liberación deseado y del coste del proceso, entre otras variables.

Los principales métodos de encapsulación pueden dividirse en tres grupos: físicos, fisicoquímicos y químicos. Entre los físicos destaca el secado por aspersión, extrusión y recubrimiento por aspersión. En el grupo de los fisicoquímicos encontramos la coacervación (técnica que involucra la atracción electrostática entre dos biopolímeros de cargas opuestas que se encuentran rodeando a un compuesto de interés) y el atrapamiento en liposomas. Y los principales métodos químicos serían la inclusión molecular y la polimerización interfacial. Esta última se produce en la interfaz entre dos fases inmiscibles; primero se forman los agentes encapsulantes mediante la emulsión o la dispersión en una de las fases inmiscibles, y luego se produce la reacción de polimerización en la interfase.

Los agentes encapsulantes que emplea la industria alimentaria para mejorar el aroma de los alimentos son de diferentes tipos. Uno de ellos son las ciclodextrinas (de las que hablamos tangencialmente en un artículo anterior sobre los alimentos funcionales). Se trata de oligosacáridos cíclicos constituidos por varias unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α-(1,4). Debe su alto poder encapsulante a la estructura: un anillo de tronco cónico con un exterior polar y una cavidad interior altamente apolar en la cual podemos introducir una amplia variedad de moléculas hidrófobas.



FUENTE: «EVOLUTION OF CYCLODEXTRIN NANOSPONGES», F. CALDERA ET AL. EN *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHARMACEUTICS*, VOL. 531, N.º 2, PÁGS. 470-479, OCTUBRE DE 2017.

NANOESPONJA formada por siete ciclodextrinas (*verde*) unidas por un agente reticulante (*lila*). Cada ciclodextrina consta de varias unidades de glucosa, que, unidas por enlaces glucosídicos, forman el característico anillo de tronco cónico que permite encapsular en su interior una amplia variedad de moléculas.

Pues bien, en la actualidad se están desarrollando nuevos agentes encapsulantes que ayudarán a mejorar el aroma de los alimentos. Uno de ellos corresponde a las nanoesponjas, redes porosas insolubles constituidas por la unión de diversas ciclodextrinas. De entre las principales características de las nanoesponjas destacan el hecho de que son sistemas de suministros nanométricos, que poseen una polaridad y dimensiones fácilmente modificables y que presentan interesantes bioactividades en comparación con las ciclodextrinas aisladas. Todavía no están autorizadas para el uso alimentario, pero se espera que pronto lo estén.

Además, gracias a los espacios intersticiales que quedan entre las ciclodextrinas que componen las nanoesponjas, estas tienen la capacidad de formar complejos no solo con moléculas hidrófobas (como las ciclodextrinas), sino también hidrófilas. Ello constituye una gran ventaja a la hora de ampliar el número de moléculas aromáticas con las que enriquecer alimentos, ya que no solo hay que restringirse a las hidrófobas.

Otra de las propiedades interesantes de las nanoesponjas es que la red que rodea las cavidades dificulta la difusión de las moléculas huésped encapsuladas, lo que promueve una cinética de liberación más lenta. Este factor resulta crucial para el futuro de los sistemas de liberación de compuestos bioactivos. ¿Qué utilidad tiene en el campo de los aromas alimentarios? Pues sirve para que la molécula huésped aromática se libere al ambiente de forma gradual, con lo que se prolonga en el tiempo su potencial aromático. Además, las nanoesponjas protegen los compuestos aromáticos de la degradación producida por el calor, el aire, la luz o la humedad.

Por otra parte, estudios recientes han demostrado la inocuidad de las nanoesponjas administradas oralmente, así como su actividad antimicrobiana intrínseca. Incluso pueden albergar mayores concentraciones de moléculas aromáticas en comparación con otros agentes encapsulantes, lo que soluciona problemas relacionados con la solubilidad y la estabilidad de los compuestos huésped.

Pero las aplicaciones de las nanoesponjas van más allá del sector alimentario. El hecho de que puedan administrarse por vía oral, parenteral, tópica o inhalatoria extiende su campo de ac-

ISTOCK/PIXDELUXE

tuación a otros sectores como el farmacéutico o el cosmético. Veamos un ejemplo.

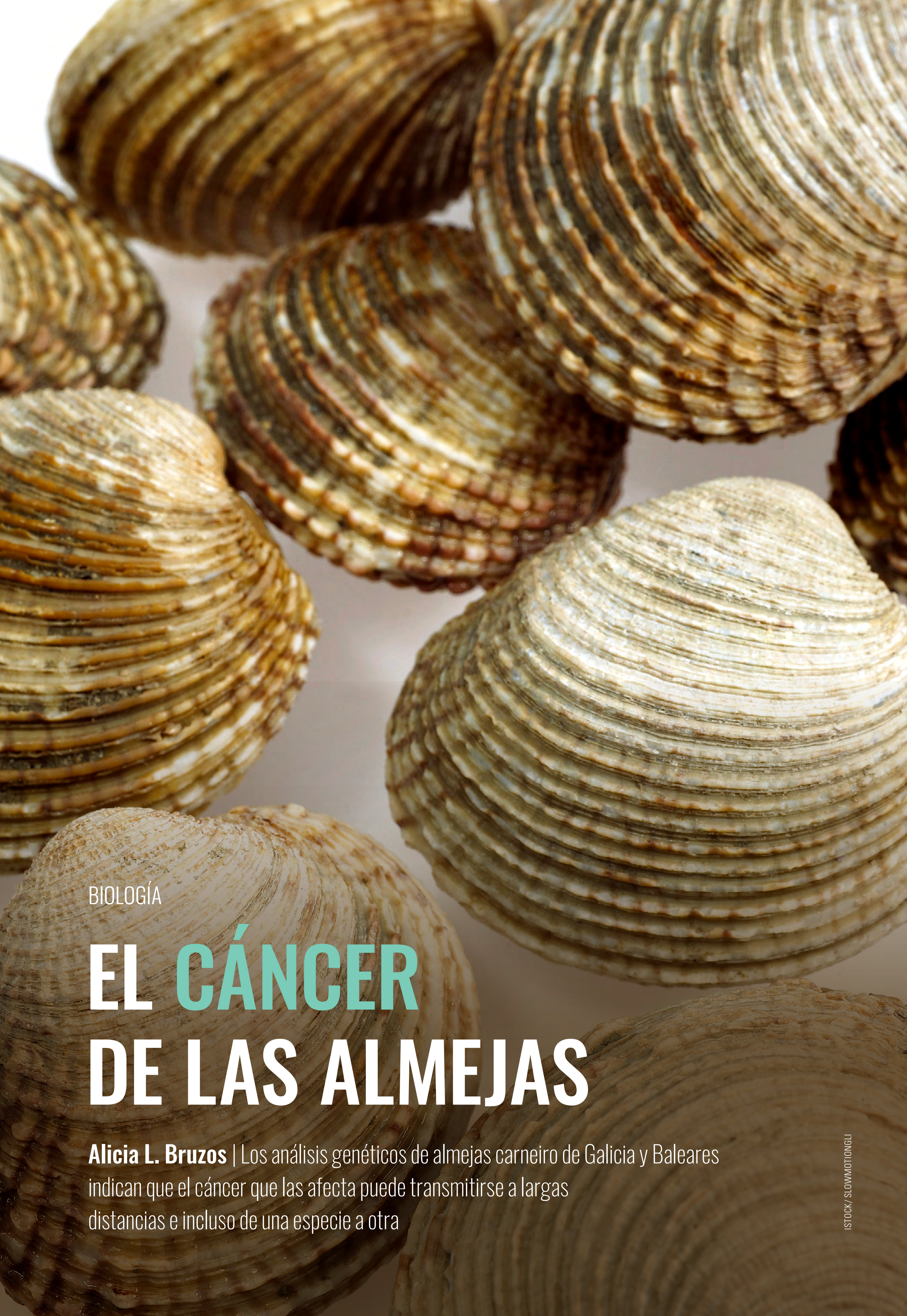
Caenorhabditis elegans es un nemátodo que se usa como modelo en estudios sobre el envejecimiento, el cáncer y la función de las moléculas antioxidantes. Este organismo es el preferido por los científicos que investigan el potencial de moléculas bioactivas, ya que, por un lado, posee un ciclo biológico corto, y, por otro, permite llevar a cabo experimentos con un elevado número de replicaciones bajo condiciones muy controladas. *C. elegans* se ha empleado para estudiar los efectos in vivo de diversas familias de compuestos naturales como las antocianinas o las catequinas del té verde.

Pues bien, la encapsulación en nanoesponjas del oxiresveratrol (un compuesto bioactivo perteneciente a la familia de los estilbenos que ayuda a ralentizar el envejecimiento celular y que está presente en diversas fuentes vegetales como, por ejemplo, las hojas de morera) favorece su biodisponibilidad para *C. elegans*, ayudando así a su absorción y potenciando el efecto antienvejecimiento del oxiresveratrol y sus propiedades anticancerígenas. Por ello, el tándem nanoesponja/oxiresveratrol se está empleando para desarrollar nuevos fármacos con diferentes objetivos.

Estimados lectores de «Planeta Alimentación», gracias al diseño y caracterización de nuevas moléculas y a la interdisciplinariedad científica, el desarrollo de nuevos productos alimentarios y farmacéuticos de nueva generación está siendo posible a una velocidad enorme. Sigamos por este camino.

José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.





BIOLOGÍA

EL CÁNCER DE LAS ALMEJAS

Alicia L. Bruzos | Los análisis genéticos de almejas carneiro de Galicia y Baleares indican que el cáncer que las afecta puede transmitirse a largas distancias e incluso de una especie a otra

ISTOCK/ SLOWMOTIONGLI

El cáncer se origina cuando una célula del cuerpo experimenta ciertas alteraciones genéticas que provocan una proliferación celular descontrolada y nociva. A veces, algunas de las células del tumor primario se extienden por el organismo y sirven de semilla para iniciar nuevos tumores en otras partes del cuerpo, un proceso conocido como metástasis. En ocasiones las células cancerosas se desplazan incluso más allá del individuo afectado y contagian a un nuevo huésped, que termina por desarrollar el mismo tumor. Este proceso, que no deja de ser una «metástasis a gran escala», se denomina cáncer contagioso o cáncer transmisible clonal. (Se lo califica de clonal porque es genéticamente idéntico al cáncer del individuo en el que se originó.)

A pesar de que la metástasis es la causa principal de muerte en más del 90 por ciento de los pacientes oncológicos, todavía es un proceso muy desconocido. La mayoría de los tratamientos se centran en la inhibición del crecimiento del tumor, con poco énfasis en su diseminación. Resulta urgente, pues, esclarecer los mecanismos que rigen la metástasis a nivel molecular. Asimismo, conocer mejor las causas genéticas del contagio del cáncer entre individuos nos podría ayudar a entender la metástasis en el cáncer no transmisible y a buscar soluciones para ponerle freno.

Por suerte, los asombrosos estudios genómicos realizados en estos últimos decenios han transformado el campo de la biología del cáncer. Gracias a los avances en genética, en la actualidad es posible determinar en qué individuo se originó una célula cancerosa y reconstruir la historia de la enfermedad, es decir, cómo se propagó entre los miembros de una población.

El cáncer contagioso se ha identificado en los perros y los demonios de Tasmania. En fecha más reciente, también se ha observado en los bivalvos marinos, entre ellos diversas especies de almejas, berberechos y mejillones. La mayoría de estos tumores solo pueden transmitirse entre individuos de la misma especie. Sin embargo, algunos de los que afectan a los bivalvos marinos pueden saltar de una especie a otra. Mientras que en los mamíferos el cáncer se transmite por el contacto físico entre un animal enfermo y otro sano, en el caso de los bivalvos no se cree que sea necesario dicho contacto; en numerosos estudios se ha sugerido que estos organismos filtradores se contagiarían a través del agua contaminada con células cancerosas, liberadas por un animal enfermo que viva cerca.

EN SÍNTESIS

La neoplasia hémica es un tumor contagioso que padecen varias especies de bivalvos. Produce una obstrucción de su sistema circulatorio que termina por provocarles la muerte.

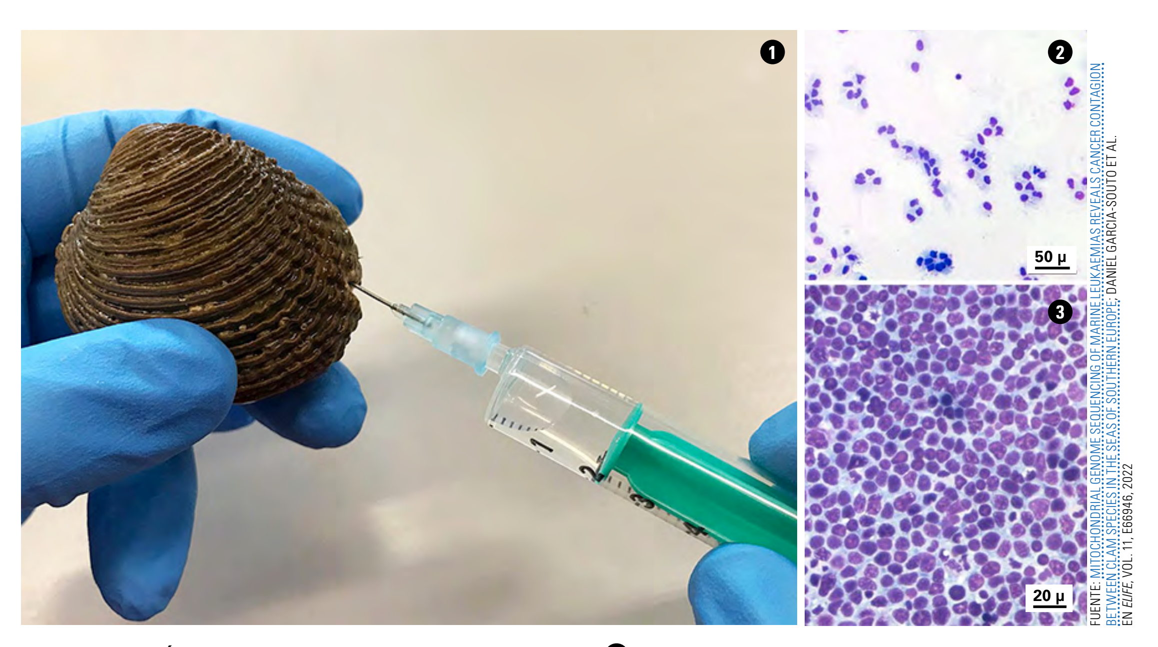
Los estudios genéticos y evolutivos del cáncer que afecta a la almeja carneiro han permitido reconstruir la historia sobre el origen y la propagación de la enfermedad.

Se ha demostrado así que puede contagiarse entre individuos muy alejados entre sí y saltar de una especie otra de bivalvo. Debido a las repercusiones ecológicas y económicas que conlleva este cáncer, se necesita hacer un seguimiento sobre su propagación actual en el medio marino.

El cáncer de los bivalvos corresponde a un tipo de leucemia (que también padecen los vertebrados) conocida como neoplasia hémica. Esta se manifiesta como un exceso de células anómalas en el sistema circulatorio, que proliferan y terminan por obstruir los tejidos de los bivalvos. La enfermedad se ha observado en muchas especies de bivalvos desde la década de 1960, pero su naturaleza transmisible se determinó hace menos de un decenio.

Las neoplasias hémicas de los bivalvos representan una amenaza para los ecosistemas marinos. Para prevenirlas es necesario identificar a qué especies afecta y hacer un seguimiento y control de su propagación. El estudio de los tumores contagiosos no solo permite conocer mejor los mecanismos de la metástasis y ofrecer información valiosa en el campo de la medicina, sino también en el de la ecología y la conservación.

En nuestro grupo de investigación nos centramos en el estudio del cáncer transmisible de los bivalvos con el objetivo de identificar los genes involucrados en su capacidad contagiosa. Los bivalvos constituyen un modelo especialmente interesante para el estudio de los tumores transmisibles porque son mucho más manejables que otros modelos, como el perro o el demonio de Tasmanaia. Desde 2016, hemos investigado el cáncer contagioso de los berberechos y hemos secuenciado más de 500 individuos para revelar los secretos que esconde su genoma sobre la enfermedad.



FUENTE: MITOCHONDRIAL GENOME SEQUENCING OF MARINE LEUKAEMIAS REVEALS CANCER CONTAGION BETWEEN CLAM SPECIES IN THE SEAS OF SOUTHERN EUROPE; DANIEL GARCIA-SOUTO ET AL. EN *ELIFE*, VOL. 11, E66946, 2022

LA EXTRACCIÓN DE HEMOLINFA de una almeja carneiro ❶ y su procesado posterior permiten observar las células de este líquido al microscopio óptico. Mientras que las almejas sanas tienen células de aspecto normal ❷, las que sufren neoplasia muestran una proliferación celular que obstruye su sistema circulatorio ❸.

También estamos estudiando varias especies de almejas, entre ellas la almeja carneiro.

Un nuevo cáncer contagioso

El carácter contagioso de la neoplasia hémica de los bivalvos fue descubierto en 2015 por investigadores de la Universidad de Columbia, tras realizar un análisis genético de la neoplasia en *Mya arenaria*, una almeja que habita sobre todo en el litoral oriental de Norteamérica. En ese estudio, Michael Metzger y sus colaboradores compararon el ADN de las células cancerosas de diferentes individuos y observaron que era muy similar. También se dieron cuenta de que, en un mismo individuo, el ADN de las células cancerosas difería del de las células sanas, lo que indicaba que la neoplasia no se había originado en él, sino en otro individuo. Dedujeron así que el cáncer se estaba transmitiendo entre las almejas de esa especie.

Mediante un enfoque genético parecido, nuestro grupo decidió investigar si la enfermedad afectaba a otra especie de bivalvo: la almeja carneiro (*Venus verrucosa*). Esta almeja es particularmente apreciada en la gastronomía francesa. En Galicia se capturan 100 toneladas al año, que se exportan a Francia y a las regiones mediterráneas de España, donde se la conoce como «escupiña gravada». Dada su importancia económica, nos extrañaba que no existieran informes de que la especie padeciera neoplasia hémica, siendo esta tan común en los bivalvos.

En nuestro trabajo, que publicamos en la revista *eLife* en enero de 2022, recolectamos individuos de seis países de la costa sur de Europa: Croacia, España, Francia, Irlanda, Italia y Portugal. Solamente detectamos la enfermedad en dos localidades de España: Mahón (Menorca), en el Mediterráneo, y Ribeira, en la costa atlántica de Galicia.

La neoplasia de la almeja carneiro presenta características similares a la que padecen otras especies de bivalvos. Sin embargo, se desconocía si era contagiosa o no, por lo que decidimos realizar la secuenciación genética de individuos sanos y enfermos de ambas localidades para indagar en esta cuestión. Nuestro análisis confirmó que la neoplasia de las almejas de Galicia y Baleares era la misma; es decir, las células cancerosas de ambas poblaciones, separadas más de 1069 millas náuticas, tenían el origen en un solo individuo. ¿Cómo pudo la enfermedad salvar tal distancia?

En un principio barajamos dos hipótesis: o bien las células cancerosas se desplazaron utilizando las corrientes oceánicas y lograron colonizar nuevas almejas de otras regiones, hasta llegar al Mediterráneo; o bien se introdujeron accidentalmente allí por la acción humana. En concreto,

las células podrían haber viajado en los tanques de agua de los barcos o ser transportadas por tierra, mar o aire con el comercio de los carneiros. Nosotros apostamos por la segunda hipótesis, la acción humana. Si el contagio se hubiese producido a través de las corrientes marinas, habría indicios de ello en el ADN de las células cancerosas, ya que dicho proceso habría tardado mucho más tiempo y habría aumentado la frecuencia de las alteraciones genéticas, o mutaciones. Pero como no existe variación entre el cáncer de las almejas de Galicia y de las Baleares, todo apunta a un viaje rápido y probablemente artificial.

ALICIA BRUZOS, PROYECTO SCUBA CANCERS

EL ESTUDIO GENÓMICO de los tumores de las almejas revela si un cáncer es contagioso o no. Si las células cancerosas de distintos individuos son muy parecidas, significa que el cáncer es transmisible (*izquierda, rojo*); si se asemejan más a las células sanas del propio individuo que a las cancerosas de otro, indica que no lo es (*derecha, distintos colores*).

Aparte de su carácter contagioso, quedan por resolver muchas incógnitas sobre esta neoplasia. Las células cancerosas contienen un elevado número de cromosomas, lo que podría haber contribuido al inicio y desarrollo de la leucemia. Otro rasgo curioso es que dichas células tienen la capacidad de emitir pseudópodos (prolongaciones del citoplasma celular que permite a algunos microorganismos desplazarse). Se trata de una característica inusual en las neoplasias hémicas de los bivalvos y se desconoce su relevancia en la que afecta a la almeja carneiro. Quizá les ayuda a propagarse o simplemente es un vestigio, un rasgo heredado sin ninguna función específica. Los próximos estudios ayudarán a discernirlo y a determinar qué características otorgan al tumor de la almeja la capacidad de contagiarse.

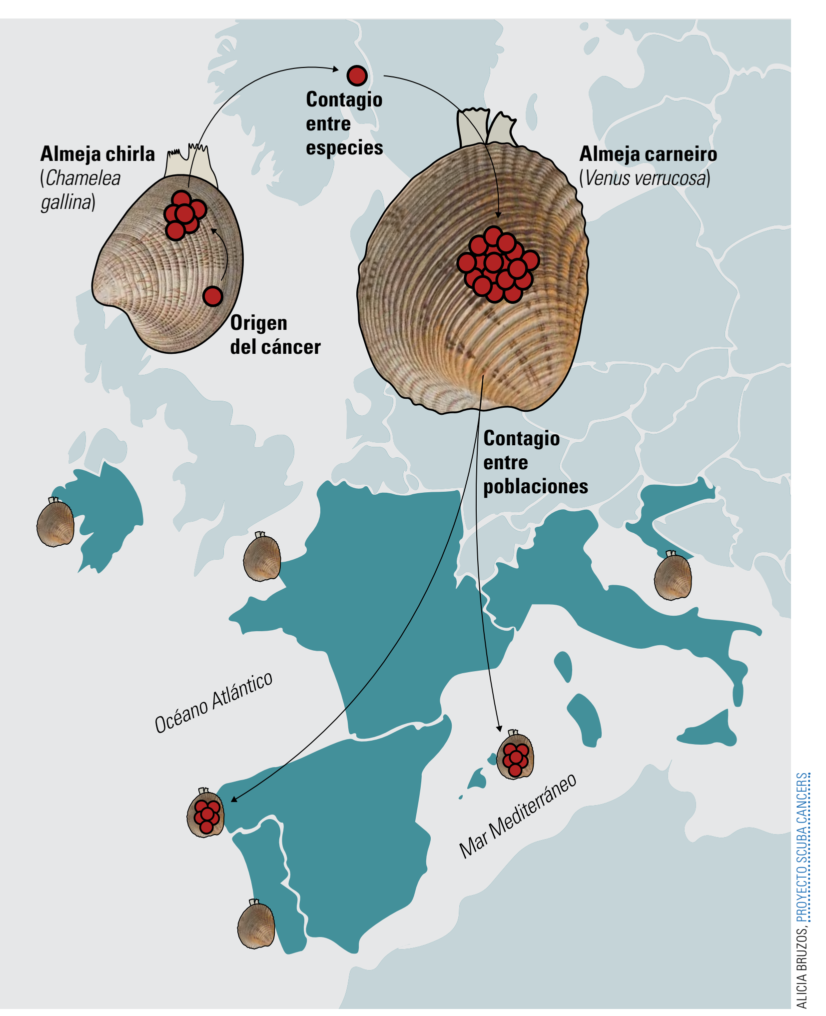
Transmisión entre especies

Un hallazgo inesperado de este estudio fue que el ADN extraído de las almejas carneiro mostró coincidencias genéticas con el ADN de otra especie: la almeja chirla (*Chamelea gallina*), que habita en el Mediterráneo. Cuando se extrae ADN de una especie, este no puede coincidir con el de otra especie a menos que la muestra se haya contaminado o que haya células de esa otra especie en la muestra. La contaminación no fue posible en esta investigación porque no existía ningún individuo de almeja chirla en el laboratorio. El análisis concienzudo del ADN mitocondrial y de varios genes nucleares revelaron que el cáncer procede de una almeja chirla en la que se originó y que ahora está parasitando a especímenes de almeja carneiro. Lo curioso es que las chirlas, que comparten hábitat con las carneiro en el Mediterráneo, no han sido diagnosticadas todavía con neoplasia hémica. Una posible explicación es que la almeja chirla se haya adaptado para resistir el contagio de este cáncer, que ya no la afecta; tal vez surgió por primera en un miembro de su especie y sobrevivió injertándose en otra, la almeja carneiro. Pero ¿cuándo sucedió ese hecho? ¿Cuál es la antigüedad de esta neoplasia?

Los cánceres transmisibles pueden llegar a ser milenarios siempre y cuando no exterminen a su especie huésped. El más antiguo que se conoce es un tumor contagioso que padecen los perros. En un artículo publicado en la revista *Science* en 2019, Adrián Báez Ortega, de la Universidad de Cambridge, junto con un equipo internacional de científicos demostraron que este tumor se

La historia del cáncer de la almeja carneiro

El estudio de distintas poblaciones europeas de esta almeja ha identificado que dos de ellas, la gallega y la balear, padecen neoplasia hémica, un cáncer que afecta a los bivalvos. Sorprendentemente, el perfil genético del tumor de ambas poblaciones es idéntico, lo que indica que es contagioso y que procede de un mismo ejemplar de almeja. No solo eso, dicho perfil genético coincide con el del cáncer que afecta a otra especie, la almeja chirla. Gracias a dichos estudios se ha podido reconstruir la historia de la enfermedad. Esta se habría originado en una almeja chirla, desde ella habría saltado a una almeja carneiro y ahora se está transmitiendo entre poblaciones de almeja carneiro.



ALICIA BRUZOS, PROYECTO SCUBA CANCERS

habría originado en Asia hace unos 8500 años y no se habría desplazado a Europa hasta hace unos mil años.

Los futuros estudios nos permitirán arrojar luz sobre la historia de la neoplasia hémica que afecta a almejas carneiro en los mares del sur de Europa. Como mínimo, se sabe que tiene unos diez años de antigüedad, ya que algunas de las almejas carneiro analizadas fueron recolectadas en 2011, y las otras, recientemente.

Nuestros hallazgos nos llevan a reflexionar acerca de que, si los tumores transmisibles pueden desplazarse fácilmente a lo largo de las líneas de navegación e infectar a especies que están estrechamente emparentadas, entonces este y otros linajes de cáncer contagioso tienen el potencial de llegar a todo el mundo.

En definitiva, el riesgo de los tumores que no respetan barreras individuales ni tampoco de especies pone de relieve la importancia de identificar y seguir el posible contagio de esta enfermedad entre los bivalvos para prevenir un posible desastre ecológico. Además, su estudio desde un punto de vista genético nos brinda nuevas oportunidades para la investigación del cáncer y podría ayudarnos a comprender mejor la metástasis.

Alicia L. Bruzos es bioinformática en el Laboratorio de Genomas y Enfermedad de la Universidad de Santiago de Compostela. Estudia la evolución de los tumores contagiosos, con especial atención a los genes implicados en la transmisibilidad del cáncer.



EN NUESTRO ARCHIVO

Biología evolutiva del cáncer. Carl Zimmer en *IyC*, marzo de 2007.
El cáncer del diablo. Menna E. Jones y Hamish McCallum en *IyC*, agosto de 2011.
El árbol del cáncer. Jeffrey P. Townsend en *IyC*, junio de 2018.

MONTAJE ÓPTICO que permite detectar los cambios inducidos por la estructura a escala nanométrica de un metamaterial en un haz de luz que incide sobre él.

CIENCIA DE MATERIALES

DOMAR LA LUZ Y EL SONIDO

Andrea Alù | Nuevos metamateriales permiten modificar las ondas para generar ilusiones ópticas y dispositivos útiles

CRAIG CUTLER

Estamos rodeados de ondas: diminutas ondas vibratorias que llevan el sonido a nuestros oídos, ondas de luz que estimulan nuestras retinas y ondas electromagnéticas que transportan las señales de radio y televisión, así como un sinfín de emisiones por Internet, hasta nuestros dispositivos. Es extraordinario que todas esas ondas se rijan, en gran medida, por los mismos principios físicos fundamentales. Y en los últimos años, nuestra capacidad para controlarlas ha experimentado una revolución gracias al uso de metamateriales diseñados a escala nanométrica.

El prefijo griego *meta-* significa «más allá». Y estos materiales especialmente fabricados nos permiten ir más allá de las formas tradicionales en que interactúan las ondas y la materia, para crear dispositivos donde la luz y el sonido parecen desobedecer las reglas habituales. El ejemplo por excelencia de esta nueva clase de materiales es el «manto de invisibilidad», un revestimiento de metamaterial que puede ocultar objetos que se hallan a plena vista. Varios equipos de investigación de todo el mundo, incluido el mío, han diseñado y producido revestimientos de este tipo, capaces de redireccionar las ondas de luz que inciden sobre ellos. En la práctica, eso evita que la luz se refleje en el objeto y llegue hasta nuestros ojos, sin ni siquiera generar sombras. Aunque estos inventos tienen limitaciones (no se parecen a los mantos de invisibilidad de Harry Potter, como se imagina mucha gente), interactúan con la luz de una forma que parece mágica.

Esos mantos son solo un ejemplo de las aplicaciones de los metamateriales. Otros materiales de esta clase permiten que la luz se propague en un sentido, pero no en el contrario (lo cual es útil para las comunicaciones y la detección de objetos), así como romper simetrías en el espacio y el tiempo. Gracias a las modernas herramientas de fabricación a escala nanométrica y a una mejor comprensión de la interacción entre luz y materia, ahora podemos diseñar metasuperficies para producir cualquier patrón, color o característica óptica imaginable.

Desviar y rotar la luz

Durante siglos, los científicos se han afanado en controlar las propiedades de la luz y el sonido cuando interactúan con nuestros sistemas sensoriales. Un primer éxito en esta búsqueda fue la invención del vidrio de colores: los antiguos romanos y egipcios aprendieron a fundir sales metálicas en el vidrio para tintarlo. Las diminutas nanopartículas de metal dispersadas en el vidrio absorben ciertas longitudes de onda y permiten que otras pasen, creando brillantes colores en obras maestras que aún admiramos hoy en día. Y, en el siglo XVII, Isaac Newton y Robert Hooke comprendieron que la tonalidad y la iridiscencia de algunos animales se deben a patrones a escala nanométrica en la superficie de sus cuerpos, otro ejemplo de que los materiales nanoestructurados pueden dar lugar a efectos ópticos sorprendentes.

Los ojos humanos son excelentes a la hora de detectar dos propiedades básicas de la luz: su intensidad (brillo) y su longitud de onda (color). Una tercera propiedad importante de la luz es su polarización, que describe la trayectoria que siguen sus campos electromagnéticos con el tiempo. Aunque las personas no podemos distinguir la polarización con nuestros ojos, varias especies animales son sensibles a ella, lo que les permite ver más, orientarse mejor y enviar señales a otras criaturas.

A finales del siglo XIX, pocos años después de que James Clerk Maxwell hallara las ecuaciones del electromagnetismo, Jagadish Chandra Bose construyó los primeros ejemplos de lo que podríamos llamar un metamaterial. Retorció a mano haces de fibras de yute, los dispuso en estructuras regulares y demostró que las ondas electromagnéticas polarizadas linealmente (luz cuyos campos eléctricos y magnéticos oscilan a lo largo de una recta) rotaban su polarización al atravesar esas estructuras e interactuar con ellas. Esa configuración puso de manifiesto que era

EN SÍNTESIS

Los metamateriales diseñados a escala nanométrica permiten manipular la luz y el sonido para crear dispositivos que parecen desobedecer las reglas habituales.

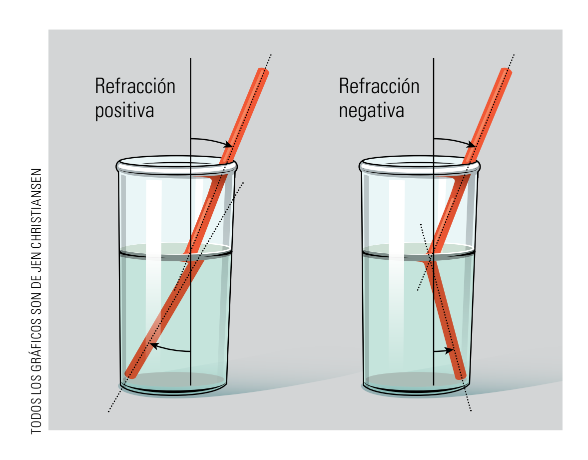
Las aplicaciones de los metamateriales incluyen mantos de invisibilidad que logran que los objetos escapen de nuestra vista, así como sistemas que obligan a las ondas luminosas o acústicas a viajar en una sola dirección.

Los próximos avances en este campo podrían servir para dirigir las ondas electromagnéticas en edificios inteligentes o para mejorar las técnicas de imagen, detección y captación de energía.

posible fabricar un material artificial para controlar la luz de formas inéditas.

La era moderna de los metamateriales se remonta al año 2000, cuando un grupo de físicos de la Universidad de California en San Diego, entre ellos David R. Smith y el difunto Sheldon Schultz, fabricó un material distinto a cualquiera visto hasta entonces, ya que poseía un índice de refracción negativo. Cuando un haz de luz se propaga entre dos medios (por ejemplo, al pasar de aire a vidrio), cambia su velocidad, lo cual provoca que el haz se desvíe, o se «refracte». La relación entre el índice de refracción de los dos materiales determina el ángulo de desviación.

Los fenómenos de refracción son la base de la mayoría de los dispositivos ópticos modernos, como las lentes y las pantallas, y explican por qué una pajita en un vaso de agua parece estar rota. Todos los materiales naturales conocidos poseen un índice de refracción positivo, lo que significa que, al viajar de un medio a otro, la luz siempre cruza la perpendicular a la interfaz, pasando a formar un ángulo mayor o menor con respecto a ella en función del cambio que experimente el índice de refracción. Por el contrario, al penetrar en un medio con un índice de refracción negativo, la luz se desviaría hacia atrás, y eso crearía efectos ópticos inesperados, como una pajita que se dobla de un modo inverosímil.



TODOS LOS GRÁFICOS SON DE JEN CHRISTIANSEN

Los científicos asumieron durante mucho tiempo que era imposible hallar o crear un material que presentara refracción negativa, y algunos incluso sostenían que eso violaría principios físicos fundamentales. Sin embargo, Schultz, Smith y sus colaboradores combinaron minúsculos anillos e hilos de cobre en una serie de tiras entrelazadas (hechas del mismo sustrato que usan las placas de circuito impreso) y demostraron que un haz de microondas experimentaba una refracción negativa al atravesar ese material especialmente diseñado. Ese notable hallazgo mostró que los metamateriales pueden ofrecer un conjunto de índices de refracción mucho mayor que el de la naturaleza, lo que abre posibilidades técnicas desconocidas. Desde entonces, se han fabricado materiales con índice de refracción negativo para un amplio intervalo de frecuencias, incluidas las de la luz visible.

Hoy podemos diseñar metasuperficies para producir cualquier patrón, color o característica óptica imaginable

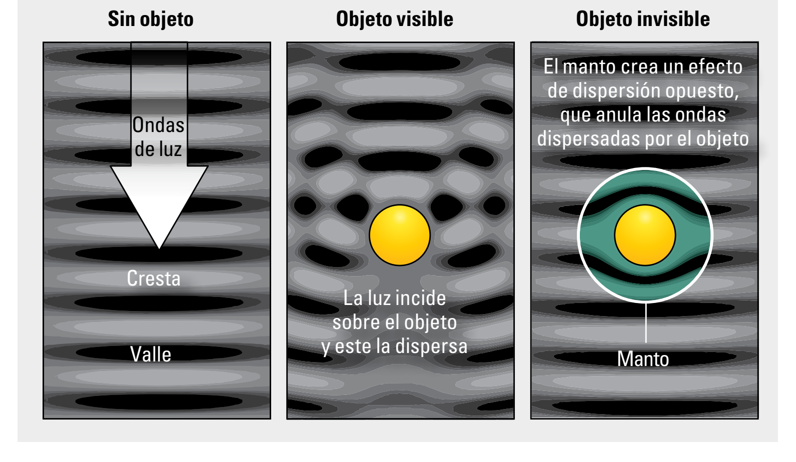
Técnicas de invisibilidad

Tras ese descubrimiento inicial, gran parte de la investigación sobre metamateriales se centró en la invisibilidad óptica. Hace unos quince años, cuando trabajaba con Nader Engheta en la Universidad de Pensilvania, diseñamos una carcasa de metamaterial que haría indetectable un objeto, al redirigir las ondas de luz que incidiesen sobre ella (sin importar su dirección de procedencia) de tal modo que anularan las dispersadas por el objeto oculto. Como resultado, este sería imposible de detectar mediante iluminación externa: desde el punto de vista electromagnético, parecería no existir.

Por esa misma época, John B. Pendry, del Colegio Imperial de Londres, y Ulf Leonhardt, hoy en el Instituto Weizmann de Ciencia de Rehovot, propusieron otras formas interesantes de usar metamateriales para invisibilizar objetos. Y en unos pocos años, diversos experimentos convirtieron esas propuestas en realidad. Por ejemplo, mi grupo desarrolló un manto tridimensional que puede reducir drásticamente la cantidad de ondas de radio que dispersa un cilindro, dificultando su detección por radar. Algunas técnicas de camuflaje ocultan los objetos al radar mediante la absorción de las ondas incidentes, pero los mantos de metamaterial son mucho más efica-

Mantos de invisibilidad

Uno de los primeros éxitos de los metamateriales ha sido la invención de revestimientos que ocultan los objetos a nuestra vista. En condiciones normales, un objeto revela su presencia al perturbar y dispersar las ondas luminosas que inciden sobre él (*centro*). Sin embargo, si rodeamos el objeto con un manto de metamaterial, la luz que rebota en este anula por completo la luz reflejada por el objeto. Este efecto produce ondas de luz no perturbadas, que encubren la presencia del objeto (*derecha*).



ces porque no solo suprimen las ondas reflejadas, sino que desvían las incidentes para eliminar la dispersión y las sombras, logrando así que el objeto recubierto resulte indetectable. Nuestro grupo y otros han extendido la invisibilidad a las ondas acústicas, al crear objetos que escapan a los instrumentos de sonar. Y otros científicos han desarrollado incluso mantos para ondas térmicas y sísmicas.

Sin embargo, todavía queda mucho para pasar de estos dispositivos a mantos de invisibilidad como los que aparecen en las películas, que permiten ver a través del objeto un fondo compuesto por múltiples longitudes de onda. Nuestros mantos del mundo real solo sirven para objetos pequeños o bandas estrechas de longitudes de onda. El reto estriba en competir contra el principio de causalidad: la información nunca puede viajar más deprisa que la luz en el vacío, así que es imposible restaurar por completo los campos electromagnéticos de detrás del objeto (para que parezca que lo están atravesando) sin reducir su velocidad.

A partir de esos principios, mi grupo ha demostrado que no es posible suprimir del todo la dispersión de un objeto para más de una longitud de onda (un único color de la luz) empleando un revestimiento pasivo de metamaterial. Incluso si generamos solo una transparencia parcial, nos enfrentamos a una difícil disyuntiva entre cuán grande puede ser el objeto que queremos ocultar y para cuántos colores de la luz podemos camuflarlo. Invisibilizar un objeto de gran tamaño en longitudes de onda del espectro visible sigue siendo una utopía, pero es posible utilizar mantos de metamateriales para objetos más pequeños y longitudes de onda mayores, con interesantes oportunidades vinculadas al radar, las comunicaciones inalámbricas y el desarrollo de sensores de alta fidelidad que no perturben su entorno durante su funcionamiento. Los mantos destinados a otros tipos de ondas, como las acústicas, poseen menos limitaciones, dado que esas ondas se propagan a velocidades mucho menores.

Simetrías espaciales

El concepto de simetría es una herramienta muy potente para el diseño y la aplicación de metamateriales con propósitos diversos. Las simetrías describen características de un objeto que no cambian cuando lo volteamos, rotamos o transformamos de alguna otra manera, y desempeñan un papel fundamental en todos los fenómenos naturales. Según un teorema formulado en 1915 por la matemática Emmy Noether, cualquier simetría de un sistema físico conduce a una ley de conservación [*véase* «Cien años del teorema de Noether», por David E. Rowe; Investigación y Ciencia, diciembre de 2018]. Un ejemplo es la conexión entre la simetría temporal y la conservación de la energía: si un sistema está descrito por leyes que no dependen explícitamente del tiempo, su energía total debe conservarse. De igual modo, los sistemas que presentan simetrías espaciales, como los cristales periódicos que permanecen inalterados bajo traslaciones o rotaciones, conservan algunas propiedades de la luz, como su polarización. Si rompemos las simetrías de forma controlada, es posible diseñar metamateriales que sortean y adaptan a nivel local estas leyes de conservación, lo que proporciona nuevas maneras de controlar y transformar la luz.

Como muestra de la importancia de las simetrías en el diseño de metamateriales, mi grupo ha fabricado un metamaterial óptico que rota de forma eficaz la polarización de la luz que lo atraviesa. (En cierto sentido, es una versión a escala nanométrica del dispositivo de yute retorcido ideado por Bose.) El material consta de múltiples láminas delgadas de vidrio, en cada una de las cuales se incrustan barras de oro de decenas de nanómetros de largo dispuestas en filas. Primero se crea una capa de vidrio donde todas las barras están orientadas en una misma dirección. Luego se coloca sobre ella una segunda lámina, idéntica a la primera salvo por el hecho de que todas las barras están rotadas un determinado ángulo. Y se siguen añadiendo capas, cada una con las barras giradas ese mismo ángulo con respecto a las de la capa anterior. En conjunto, el apilamiento alcanza un espesor de apenas una micra y, sin embargo, presenta cierto grado de ruptura de la simetría espacial en relación con los cristales periódicos naturales, en los que todas las moléculas están alineadas en filas rectas.

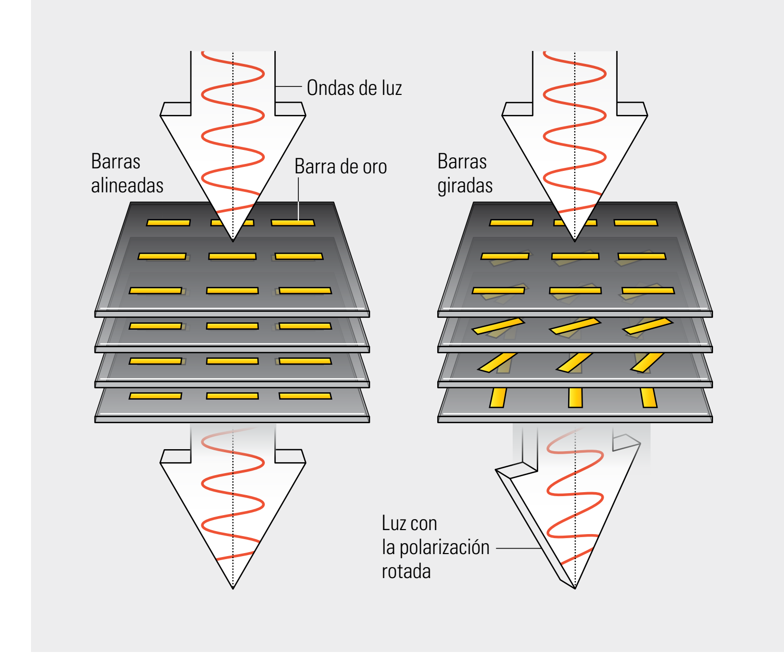
Cuando la luz atraviesa ese fino metamaterial, interactúa con las barras nanométricas de oro y se frena debido a las oscilaciones de los electrones en su superficie. Las interacciones resultantes entre luz y materia están controladas por la simetría distorsionada de la red cristalina y permiten rotar de manera considerable la polarización de la luz incidente a lo largo de un amplio intervalo de longitudes de onda. Esta forma de controlar la polarización puede ser útil en muchos dispositivos, como las pantallas de cristal líquido o ciertas herramientas analíticas empleadas en la industria farmacéutica, que se basan en la rotación de la polarización inducida (en general, con mucha menos eficacia) por los materiales naturales.

Las simetrías rotacionales también dictan otras respuestas de los metamateriales. El grupo de Pablo Jarillo-Herrero, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró hace poco que dos capas de grafeno (de un solo átomo de espesor) próximas entre sí y rotadas un ángulo preciso una con respecto a otra llevan a la sorprendente aparición de superconductividad [*véase* «Superconductividad en el grafeno», por Elizabeth Gibney; Investigación y Ciencia, mayo de 2019]. Esta propiedad, que las capas no poseen por separado, permite que los electrones circulen a través del material con resistencia nula, como consecuencia de la ruptura de simetría inducida por el giro. Para un ángulo de rotación concreto, las interacciones que surgen entre los átomos vecinos de las dos capas definen una respuesta electrónica totalmente nueva.

En 2020, inspirados por ese resultado, mostramos un fenómeno similar que puede ocurrir, no con los electrones, sino con la luz. Apilamos dos capas delgadas de trióxido de molibdeno (MoO_3) y rotamos una con respecto a otra.

Ruptura de simetría

Una forma de alterar el modo en que las ondas se propagan a través de un material es romper la simetría habitual de este. El grupo del autor desarrolló un metamaterial apilando láminas de vidrio que tenían incrustadas barras de oro nanométricas. Las barras de cada capa están giradas cierto ángulo con respecto a las de la anterior, lo que destruye la simetría perfecta entre las capas. Como resultado, el material rota la polarización de las ondas de luz que lo atraviesan, un efecto útil en muchos dispositivos modernos.



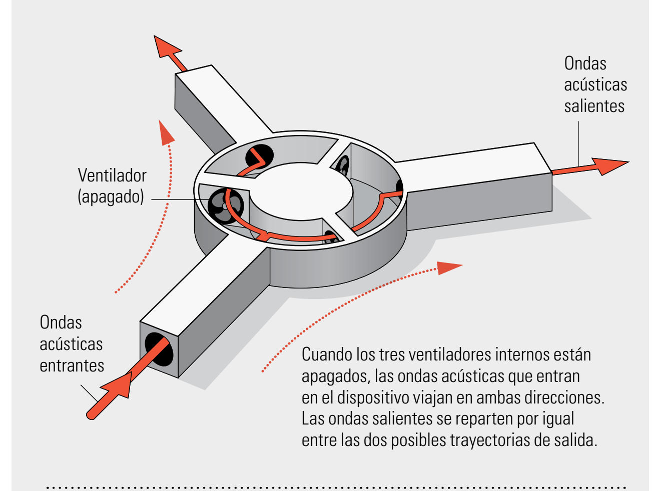


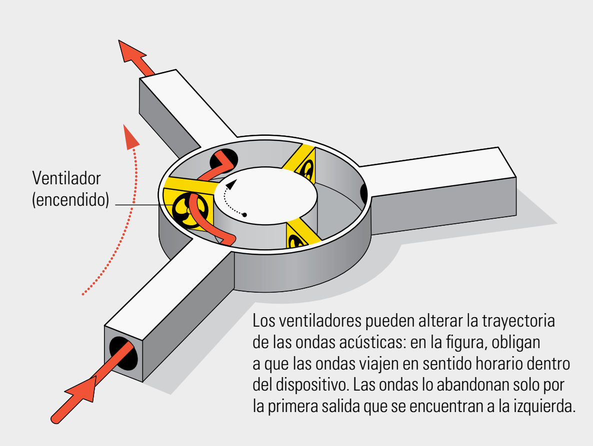
UN METAMATERIAL es sometido a pruebas dentro de una cámara que permite medir de forma muy precisa la radiación en longitudes de onda de radio y milimétricas.

CRAIG CUTLER

Sonido unidireccional

Un dispositivo creado por el grupo del autor ofrece otra manera de experimentar con la ruptura de simetría. Se trata de una cavidad circular de aluminio, donde unos pequeños ventiladores establecen una corriente de aire. Debido al efecto Doppler, la cavidad resuena a frecuencias distintas para las ondas acústicas que viajan en sentido horario y para las que lo hacen en sentido contrario. La interferencia resultante obliga a que el sonido se propague en una única dirección.



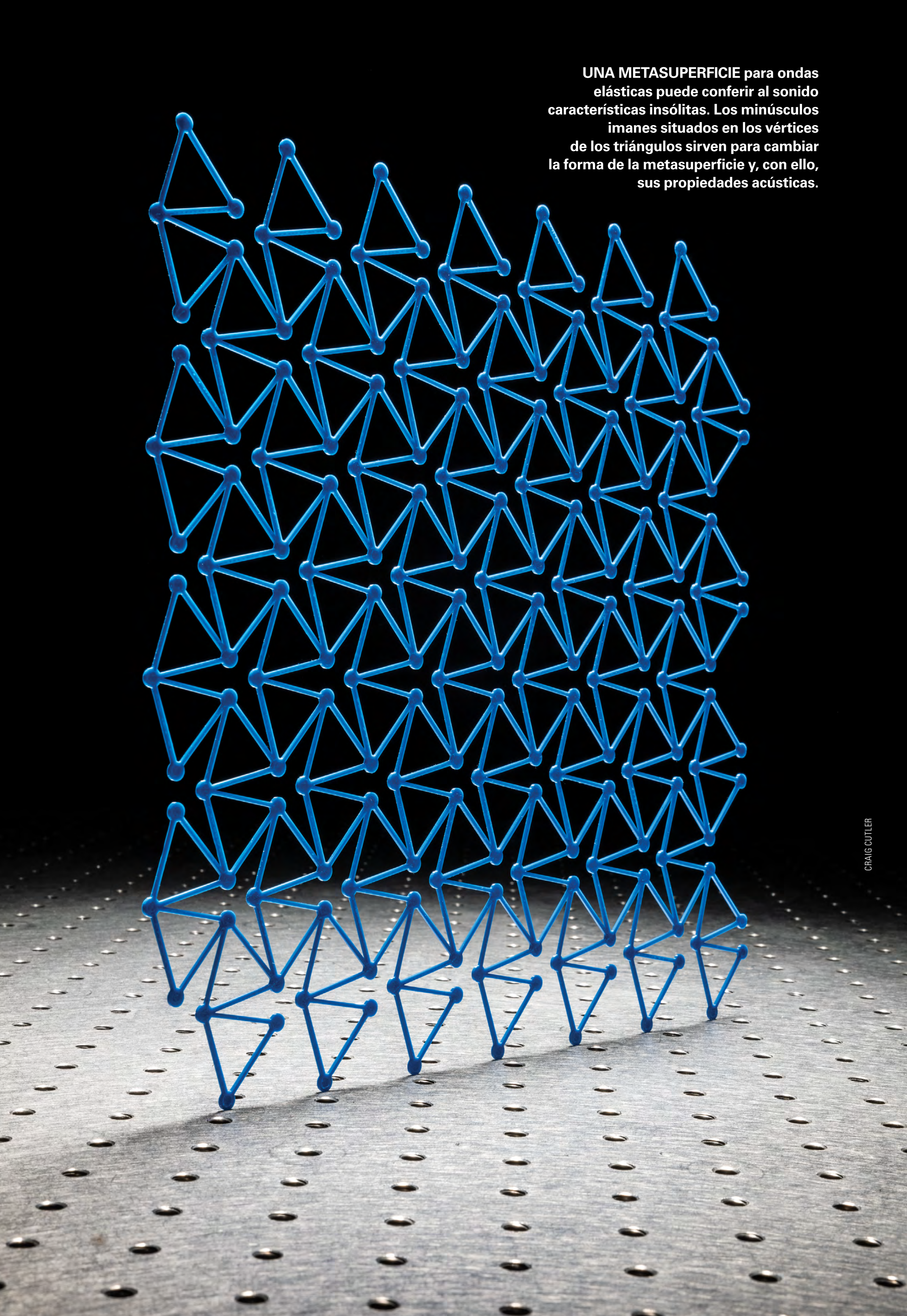


Por último, podemos conectar muchos de esos dispositivos para formar una red hexagonal que permite la propagación unidireccional del sonido a lo largo de sus bordes.



Cada una de las capas es una red cristalina periódica, donde las moléculas están dispuestas siguiendo un patrón repetitivo. Cuando la luz penetra en ese material, puede excitar las moléculas y hacer que vibren. Si la luz está polarizada en una dirección alineada con las moléculas, ciertas longitudes de onda provocan fuertes vibraciones de la red cristalina, un fenómeno conocido como resonancia fonónica. En cambio, si la polarización es perpendicular, esas mismas longitudes de onda inducen una respuesta mucho más débil en el material, porque no desencadenan tales vibraciones. Podemos aprovechar esta marcada asimetría en el comportamiento óptico rotando las láminas. Una vez más, el ángulo de giro controla la respuesta óptica de la doble capa y la modifica de forma drástica, tornándola muy distinta a la de una única capa.

Por ejemplo, la luz emitida por una molécula situada en la superficie de un material ordinario, como el vidrio o la plata, se propaga hacia el exterior en forma de ondas circulares, como las que surgen cuando una piedra golpea la superficie del agua en un estanque. Pero, al poner las dos capas de MoO_3 una sobre otra, modificar el ángulo de giro entre las dos redes cristalinas altera de manera radical la respuesta óptica. Para un ángulo concreto, la luz se ve obligada a viajar en una única dirección, sin expandirse en ondas circulares, el efecto análogo a la superconductividad para los fotones. Este fenómeno abre la posibilidad de crear imágenes a escala nanométrica que excedan los límites de resolución de los sistemas ópticos habituales; y es que permite transportar sin distorsión detalles de una imagen más pequeños que la longitud de onda, llevando la luz más allá de los límites impuestos por la difracción. En estos materiales, la luz está tan ligada a las vibraciones del material que juntos forman una única cuasipartícula (un polaritón), ofreciendo así una interesante plataforma para las técnicas cuánticas.



UNA METASUPERFICIE para ondas elásticas puede conferir al sonido características insólitas. Los minúsculos imanes situados en los vértices de los triángulos sirven para cambiar la forma de la metasuperficie y, con ello, sus propiedades acústicas.

CRAIG CUTLER

Simetrías temporales

El papel de la simetría en los metamateriales no se limita a las simetrías espaciales, como las que se pueden romper por medio de una rotación geométrica. Las cosas se ponen aún más interesantes cuando experimentamos con la ruptura de la simetría bajo inversión temporal [*véase* «Ruptura de simetría bajo inversión temporal», por José Bernabéu y Fernando Martínez Vidal; Investigación y Ciencia, octubre de 2013].

Las ecuaciones que gobiernan los fenómenos ondulatorios suelen ser reversibles en el tiempo: si una onda se puede propagar del punto *A* al *B*, también puede hacerlo en sentido contrario (de *B* a *A*) con las mismas propiedades. La simetría bajo inversión temporal explica la expectativa habitual de que, si podemos oír o ver a alguien, esa persona también nos puede oír o ver a nosotros. La ruptura de esta simetría, o «reciprocidad», en la transmisión de las ondas es importante en muchas aplicaciones. Así, la transmisión no recíproca de ondas de radio permite comunicaciones inalámbricas más eficientes, donde es posible transmitir y recibir señales al mismo tiempo y sin interferencias; además, evita la contaminación causada por la reflexión de las señales emitidas. La no reciprocidad también puede proteger las delicadas fuentes de luz láser frente a reflexiones indeseadas, y ofrece la misma ventaja para las técnicas de radar y lídar.

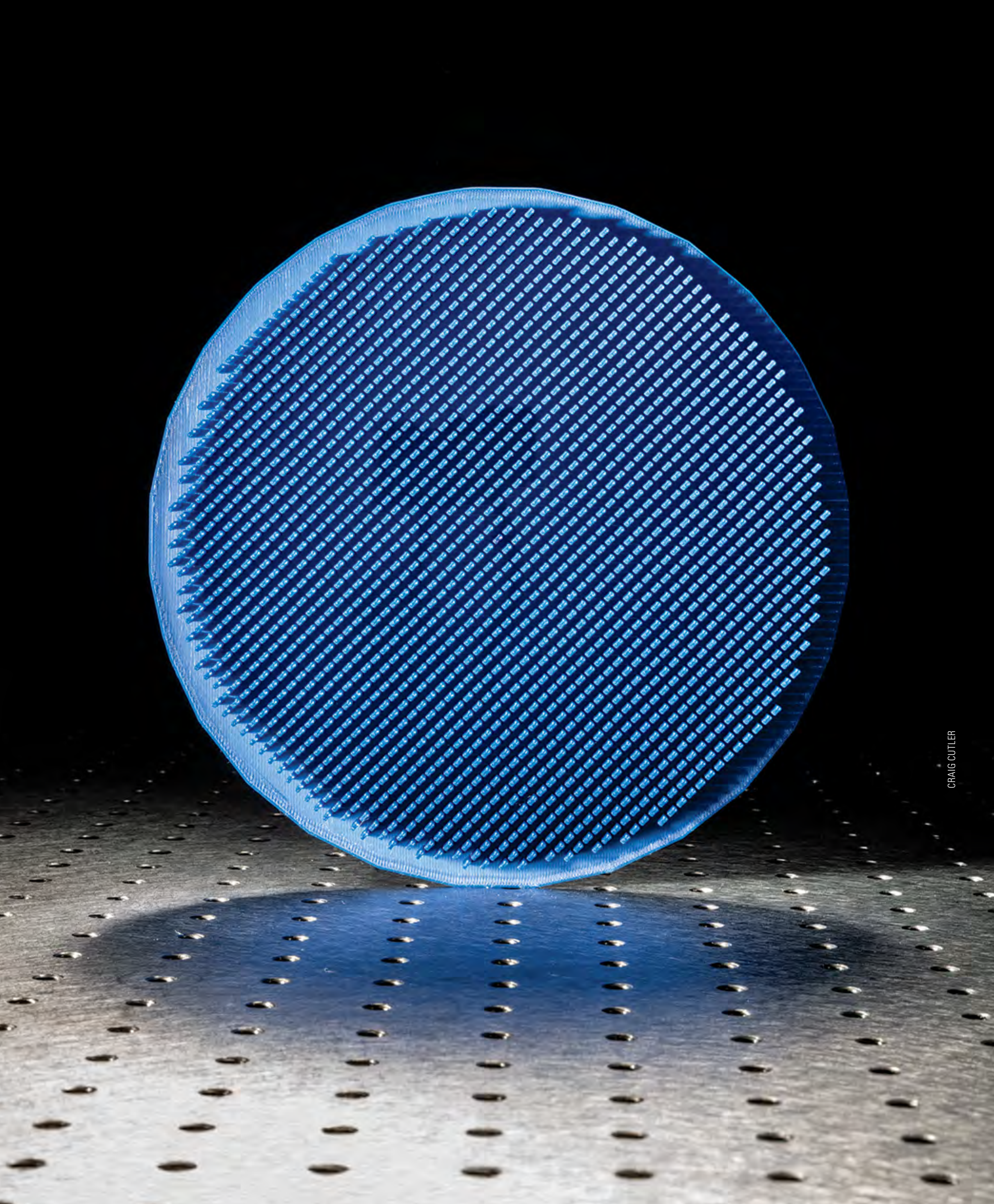
Una forma establecida de romper esa simetría fundamental se sirve del magnetismo. Cuando sometemos una ferrita (un material no metálico con propiedades magnéticas) a un campo magnético constante, en sus moléculas comienzan a circular diminutas corrientes que giran en un sentido determinado por la orientación del campo magnético. A su vez, esas corrientes microscópicas inducen el llamado efecto Zeeman, un desdoblamiento de las líneas espectrales que causa que la luz polarizada circularmente interactúe con las moléculas con una energía distinta dependiendo de si la polarización es dextrógira (el campo eléctrico rota en sentido horario) o levógira (antihorario). Y esa diferencia de energía es proporcional al campo magnético aplicado.

Cuando una onda polarizada linealmente se propaga a través de una ferrita magnetizada, el efecto global es una rotación de la polarización, en cierto modo similar a la que ocurre en los metamateriales que vimos antes. La principal diferencia es que, en este caso, el sentido en que rota la polarización viene determinado por el campo magnético externo y no por la ruptura de simetría en los constituyentes del metamaterial. En consecuencia, en estos materiales magnetizados, el sentido de la rotación de la polarización es el mismo cuando la luz viaja en una dirección y cuando lo hace en la contraria. Eso viola la reciprocidad y rompe la simetría bajo inversión temporal.

Podemos aprovechar ese fenómeno para fabricar dispositivos que permitan la transmisión de las ondas en una única dirección. Pero hay pocos materiales naturales con las propiedades magnéticas necesarias para lograr ese efecto, y aquellos que las tienen pueden ser difíciles de integrar en los dispositivos modernos basados en el silicio. En los últimos años, los expertos en metamateriales se han esforzado en desarrollar formas más eficientes de romper la reciprocidad ondulatoria sin emplear materiales magnéticos.

Es posible integrar metamateriales en los edificios inteligentes para controlar y guiar a voluntad las ondas electromagnéticas

Mi grupo ha demostrado que es posible sustituir las diminutas corrientes que circulan en la ferrita magnetizada por elementos mecánicos que rotan en un metamaterial. Hemos logrado ese efecto en un dispositivo acústico compacto, usando pequeños ventiladores de ordenador que establecen una coriente de aire en el interior de una cavidad circular de aluminio, en lo que constituye el primer sistema sin reciprocidad de ese tipo para el sonido. Al activar los ventiladores, las frecuencias de resonancia de la cavidad son distintas para las ondas acústicas que giran en sentidos opuestos, del mismo modo que el efecto Zeeman cambia la energía de las interacciones de la luz en la ferrita. Como resultado, una onda acústica que se propaga en el interior de esa cavidad experimenta una interacción muy distinta dependiendo de si lo hace en sentido



LAS VIBRACIONES MECÁNICAS se propagan a través de una metasuperficie que puede dirigir el sonido y aumentar de forma notable sus interacciones con la materia.

CRAIG CUTLER

horario o antihorario. Eso permite enviar ondas acústicas de manera no recíproca (es decir, en una única dirección) a través del dispositivo. Cabe destacar que la velocidad del flujo de aire requerido para crear este efecto es cientos de veces menor que la de las ondas acústicas, por lo que el desarrollo de esta técnica es bastante sencillo. Y si conectamos muchos de estos dispositivos compactos de manera que formen una red, tendremos un metamaterial. Esas redes cristalinas especialmente fabricadas transportan el sonido de formas no recíprocas y muy inusuales, que recuerdan a las propiedades únicas con que se desplazan los electrones en los aislantes topológicos [*véase* «Aislantes topológicos», por David Carpentier y Laurent Lévy; Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

¿Podemos usar un truco similar en el caso de la luz? En 2018, el grupo de Tal Carmon, en la Universidad de Tel Aviv, demostró un efecto análogo: los investigadores hicieron girar a frecuencias de kilohercios el cabezal de lectura de un disco duro acoplado a una fibra óptica y lograron la transmisión no recíproca de luz a través de ella. Su dispositivo mostró que se pueden usar elementos mecánicos en rotación para forzar a la luz a viajar en una sola dirección a través de un dispositivo. Quizá sería más práctico emplear metamateriales fabricados con componentes que varíen con el tiempo y que puedan activarse y desactivarse con determinados patrones espaciales para emular una rotación. A partir de estos principios, mi grupo ha creado varios aparatos que funcionan de manera eficaz como dispositivos no recíprocos y son lo bastante pequeños para integrarlos en sistemas electrónicos de mayor tamaño.

También hemos trasladado esas técnicas a la emisión térmica, la radiación liberada debido al calor. Todos los cuerpos calientes emiten luz, y un principio universal denominado ley de Kirchhoff de la radiación térmica afirma que los materiales recíprocos en equilibrio deben absorber y emitir radiación térmica al mismo ritmo. Esta simetría impone varias limitaciones a la hora de obtener dispositivos para gestionar la energía térmica o para captar energía, como las células solares. Empleando principios de diseño similares a los que hemos descrito para romper la reciprocidad de la luz, estamos tratando de concebir sistemas que no respeten la simetría entre absorción y emisión. Podemos diseñar metamateriales que absorban calor de manera eficiente sin necesidad de volver a emitir una parte de la energía absorbida hacia la fuente de radiación, como haría un material normal, aumentando así la cantidad de energía que se puede captar. La aplicación de ideas análogas en el campo de la estática también nos ha permitido imprimir en 3D un objeto que transmite de forma asimétrica una fuerza mecánica estática. Sería una especie de guante unidireccional, capaz de aplicar presión sin experimentar la reacción.

Muchas otras maravillas

Las oportunidades que ofrecen los metamateriales y las rupturas de simetría para manipular y controlar las ondas no acaban aquí. Los científicos han descubierto otras maneras de «engañar» a la luz y al sonido, por ejemplo, combinando de formas novedosas la ruptura de simetrías geométricas y temporales. Es posible integrar metamateriales en las paredes y ventanas de los edificios inteligentes para dominar y dirigir a voluntad las ondas electromagnéticas. Las metasuperficies con estructuras nanométricas pueden convertir voluminosos sistemas ópticos en dispositivos más delgados que un cabello humano, lo que mejoraría las técnicas de imagen, detección y captación de energía. Los metamateriales acústicos y mecánicos pueden guiar el sonido con un grado de control sin precedentes. Esperamos muchas otras maravillas, dadas las enormes oportunidades que nos brindan la ciencia e ingeniería de materiales, las modernas técnicas de fabricación a escala nanométrica y nuestro mayor conocimiento de las interacciones entre luz y materia.

Andrea Alù es físico e ingeniero en la Escuela de Posgrado de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, donde dirige la Iniciativa de Fotónica en el Centro de Investigación Científica Avanzada.



EN NUESTRO ARCHIVO

Superlentes y supermateriales. John B. Pendry y David R. Smith en *IyC*, septiembre de 2006.

El antiimán. Àlvar Sánchez, Carles Navau y Jordi Prat en *IyC*, mayo de 2013.

Los metamateriales se acercan al mercado. Lee Billings en *IyC*, febrero de 2014.



EVOLUCIÓN HUMANA

EL ORIGEN DEL BIPEDISMO HUMANO

Jeremy DeSilva | Nuevos fósiles cuestionan las ideas arraigadas sobre el modo y el momento en que nuestros ancestros empezaron a caminar erguidos

MARK SMITH

Mucho antes de poseer un encéfalo voluminoso y de desarrollar el lenguaje, antes incluso de dominar el fuego y fabricar herramientas líticas, nuestros ancestros hicieron lo que ningún mamífero había hecho jamás: se pusieron de pie. Las adaptaciones óseas para la marcha bípeda son evidentes en los homininos más antiguos, que tienen entre siete y cinco millones de años. Caminar sobre dos extremidades en vez de cuatro propició todos los cambios evolutivos que vendrían después. Permitió ampliar el ámbito territorial y diversificar la alimentación, y transformó el parto y la crianza. Esta peculiar forma de locomoción fue decisiva para todo lo que nos hace humanos.

La imagen arquetípica de la evolución humana es una fila de individuos cada vez más altos y derechos, desde un simio encorvado hasta un *Homo sapiens* triunfal, enhiesto sobre sus dos pies. Esta representación, conocida como «marcha del progreso», se popularizó en la década de 1960, y desde entonces adorna infinidad de libros, camisetas, pegatinas para coches y tazones de té.

Sin embargo, los descubrimientos paleontológicos de los últimos veinte años nos obligan a revisar esta imagen lineal. Ahora sabemos que hubo diversas especies de homininos, asentadas en diferentes enclaves del continente africano, a veces simultáneamente, que adquirieron distintas maneras de caminar. La bipedación espoleó un largo e intenso período de improvisaciones evolutivas en torno a esta forma de moverse. Nuestro andar moderno no estaba predeterminado, sino que cada especie marchó al ritmo que imponían sus objetivos —a fin de cuentas, la evolución no hace planes—. La nuestra es, pues, una más de las formas de caminar que ensayaron los primeros homininos; es la variante que prevaleció.

Huellas enigmáticas

Queriendo esquivar una boñiga voladora, como haría cualquiera, los paleontólogos Kay Behrensmeyer y Andrew Hill, de visita en el yacimiento de la arqueóloga Mary Leakey en Laetoli (Tanzania), se agazaparon en una barranca, donde podrían coger más munición para la guerra de excrementos de elefante que acababa de estallar. Ese día, 24 de julio de 1976, se hizo uno de los descubrimientos más afortunados de la paleoantropología.

En efecto, no fue bosta lo que vieron Hill y Behrensmeyer en el suelo, sino unas huellas de elefante junto a las impresiones de unas gotas de lluvia, fosilizadas en una capa de ceniza volcánica que cayó hace 3,66 millones de años. Decretada una tregua en la guerra excrementicia, los demás científicos se acercaron a contemplar el hallazgo. Si los fósiles nos hablan someramente de cómo era un animal extinto, las huellas inmortalizan un momento preciso en su vida como si fueran una fotografía.

Durante las semanas siguientes, Leakey y su equipo exploraron la zona que llamaron «yacimiento A», barriendo las capas de sedimento para revelar miles de huellas, la mayoría de antílopes y liebres, pero también de elefantes, rinocerontes, jirafas, grandes félidos, aves e incluso un coleóptero. Con la esperanza de encontrar homininos, Leakey les pidió que buscasen alguna pisada bípeda, que quizá tuvieran suerte. Y en septiembre la tuvieron. Peter Jones y Philip Leakey encontraron cinco pisadas consecutivas de una criatura que se desplazaba sobre dos patas, no sobre cuatro. ¿Un hominino? Podría ser, pero las huellas tenían una forma extraña; además, aquella criatura cruzaba la extremidad izquierda por delante de la derecha, como una modelo sobre la pasarela, y no a la usanza humana normal. El rastro bípedo del yacimiento A era un misterio.

Dos años después, otros dos miembros del equipo de Leakey, Paul Abell y Ndibo Mbuika, descubrieron otro grupo de pisadas a dos kilómetros del yacimiento A, un lugar que llamaron «yacimiento G». Se trataba del rastro de dos o tres individuos, tal vez cuatro, que habían avanzado al mismo ritmo sobre la ceniza enlodada,

EN SÍNTESIS

Tradicionalmente se creía que el bipedismo habría surgido en uno de nuestros ancestros y que las sucesivas especies del linaje humano adoptaron una postura cada vez más erguida.

Pero las investigaciones más recientes de pisadas y huesos fósiles desmienten esa imagen lineal e indican que distintas especies de homininos bípedos vivieron en la misma época e incluso el mismo lugar.

Estos y otros estudios de simios antropomorfos extintos sugieren que el bipedismo sería una antigua innovación evolutiva que nuestros ancestros aprovecharon cuando cambió su entorno y pasaron de una vida arborícola a una vida terrestre.



LAS PISADAS FÓSILES de Laetoli (Tanzania) indican que, hace 3,66 millones de años, habitaban esta zona dos especies de homininos bípedos. Se cree que las pisadas del yacimiento G (*derecha*) son de *Australopithecus afarensis*, mientras que las del yacimiento A (*izquierda*) serían de otro hominino cuya identidad es un enigma.

dejando 69 huellas de una apariencia humana asombrosa. Se cree que esas huellas las hicieron un grupo de *Australopithecus afarensis*, la especie de Lucy, de la que se habían encontrado fósiles en Laetoli. No obstante, el rastro que componen las huellas del yacimiento G son marcadamente distintas de las del yacimiento A, por lo que, si fue un hominino quien las hizo, ¿qué clase de criatura bípeda dejó sus pisadas en el yacimiento A?

En la década de 1980, el antropólogo Russ Tuttle, de la Universidad de Chicago, intentó resolver el enigma. Tras comparar la forma de las huellas del yacimiento A con las de chimpancés, humanos descalzos y osos amaestrados, Tuttle concluyó que las huellas eran de una segunda especie de hominino presente en Laetoli durante el Plioceno o de un oso que caminaba erguido. Otros investigadores también dieron por válida la hipótesis del oso, quizá porque la evolución lineal del bipedismo humano era el paradigma dominante. Como consecuencia, las huellas del yacimiento G fueron objeto de estudios exhaustivos y cosecharon una fama mundial, mientras que las del A quedaron relegadas al olvido. Tuvieron que pasar seis lustros para que alguien volviera a fijarse en ellas.

El Colegio Universitario Dartmouth, donde enseño antropología, es una pequeña facultad de humanidades en el estado de Nueva Hampshire, situada en un valle entre las montañas Blancas, del mismo estado, y las montañas Verdes, en el estado de Vermont. Aunque está a solo dos horas en coche de Boston, su lema latino es *vox clamantis in deserto* («la voz que clama en el desierto»). El valle está cubierto por grandes arboledas de arces, fuente inagotable del sirope dulce típico de este rincón de Norteamérica; el campus linda con el famoso sendero de los Apalaches y en los bosques circundantes habitan los osos, muchos osos.

En 2017, junto con mi alumna Ellison McNutt, que ahora es profesora de anatomía en la Uni-

versidad de Ohio, nos pusimos a trabajar con Ben Kilham, biólogo de la localidad y experto en osos negros, para analizar las huellas de oseznos, cuyos pies tienen el mismo tamaño que las huellas A de Laetoli. Tentándolos con sirope de arce y compota de manzana, conseguimos que se levantasen sobre los cuartos traseros y cruzasen una pista embarrada para el experimento. Nos sorprendió comprobar que sus huellas y su mecánica ambulatoria no se correspondían con las impresiones fósiles del yacimiento A. La impronta del talón del oso es estrecha y sus pasos están muy espaciados, porque la anatomía de la pelvis y las rodillas hace que se tambaleen hacia delante y atrás al caminar erguidos. Comenzamos a dudar de la hipótesis osuna.

Es muy posible, quizás incluso probable, que el bipedismo surgiese varias veces en la base del árbol filogenético de los homininos

Han pasado más de cuarenta años desde que se descubrió el yacimiento A. Durante este tiempo, las lluvias estacionales han ido decapando el sedimento de las colinas de Laetoli, con lo que han quedado expuestas decenas de millares de fósiles. Muchos de estos fósiles los han recuperado los equipos de Charles Musiba, de la Universidad de Colorado en Denver; Terry Harrison, de la Universidad de Nueva York; y Denise Su, de la Universidad Estatal de Arizona. Sabemos por otros yacimientos que un úrsido extinto llamado *Agriotherium* vivió en África durante el Plioceno, pero ninguno de los fósiles de animales que han encontrado estos equipos pertenece a un oso. Había que echarle una nueva mirada a las pisadas del yacimiento A, pero las mismas lluvias que sacan fósiles a la luz también tienen una gran fuerza erosiva, por lo que suponíamos que habrían sido borradas con los años. Afortunadamente, nos equivocamos.

En 2019, viajé con Musiba a Laetoli y utilizamos los detallados dibujos de Mary Leakey, como si fuesen el mapa del tesoro, para encontrar el lugar exacto donde deberían estar las huellas de la criatura bípeda, y empezamos a cavar. Al cabo de unos días, uno de los tanzanos del equipo, Kallisti Fabian, señaló al suelo y masculló la palabra *mtu*, que en suajili significa «humano». Las había encontrado. Las lluvias no habían destruido las pisadas, sino que las habían cubierto y conservado con una fina capa de sedimento. Con depresores linguales y ramas de arbustos, terminamos de limpiar las huellas y expusimos los detalles del dedo gordo, que hasta entonces habían permanecido ocultos. Para ello usamos un escáner tridimensional de láser de alta resolución, que nuestros colegas de la década de 1970 no tenían a su alcance. El talón del yacimiento A es grande, y el dedo gordo es el dominante, al igual que en el ser humano y en los simios antropomorfos. Así que un oso no era. Las pisadas eran de un hominino, pero ¿cuál?

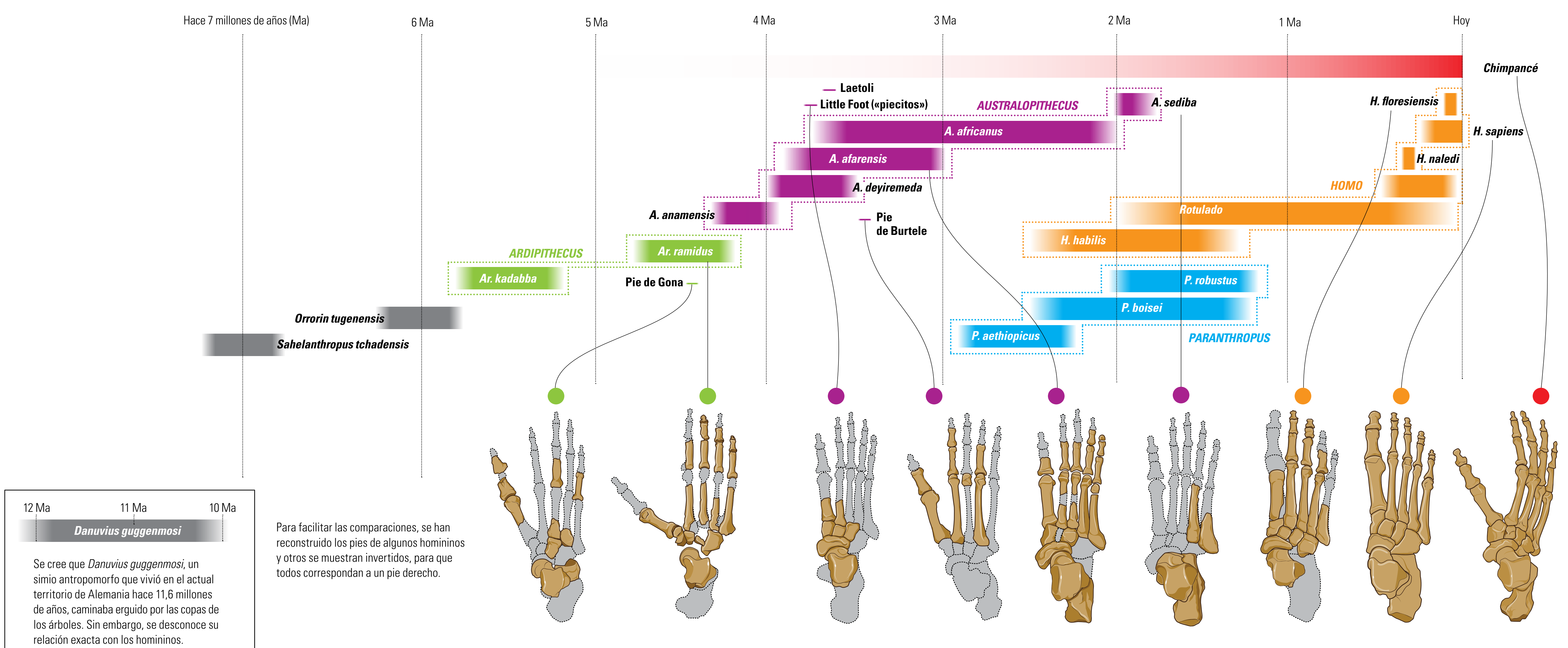
Si paseamos por la playa podemos ver la variedad de huellas que dejamos los *H. sapiens* en la arena: las cortas y delicadas de los chiquitines, por ejemplo, junto a las más largas y combadas de sus madres. Los humanos modernos tenemos formas y tamaños corporales muy distintos, igual que nuestros pies. Casi con toda seguridad, lo mismo pasaba con *A. afarensis*. Quizá las huellas del yacimiento A y del G mostraban la variación normal dentro de una misma especie, en este caso la de Lucy, o sea que las del yacimiento A serían las pisadas de una cría. Eso es lo que pensé al principio.

A nuestro equipo se incorporó entonces Kevin Hatala, experto en huellas podálicas de la Universidad Chatham de Pittsburgh (Pensilvania), que había participado en el descubrimiento y análisis de unas pisadas de *H. erectus* de 1,55 millones de antigüedad en Ileret (Kenia). Con él comparamos las huellas A con las huellas mejor conservadas del yacimiento G y de otro rastro descubierto en 2015 en el yacimiento S, además de centenares de pisadas de humanos y de chimpancés. Las diferencias que observamos no encajaban con el intervalo de variación que encontramos en las personas de todas las edades de hoy.

Las huellas del yacimiento A eran tan diferentes de las del G y el S como lo son las de un

Andares garbosos

Durante mucho tiempo se creyó que la marcha bípeda había evolucionado en secuencia lineal, de modo que cada especie sucesiva se habría parecido más a nosotros en su postura y manera de andar. Hoy se sabe, en cambio, que diferentes especies de homininos coexistieron en el tiempo y el espacio, cada una con su particular forma de andar, y eso fue así durante la mayor parte de nuestra historia evolutiva. Por ejemplo, hace dos millones de años, en la región de la Cuna de la Humanidad, en la actual Sudáfrica, coincidieron tres géneros distintos: *Paranthropus*, *Australopithecus* y *Homo*. Cada uno de ellos caminaba a su manera. Algunos homininos, como *Australopithecus sediba* y *Homo naledi*, conservaban las adaptaciones arborícolas mucho después de que otros hubiesen apostado por la vida en tierra firme.



Se cree que *Danuvius guggenmosi*, un simio antropomorfo que vivió en el actual territorio de Alemania hace 11,6 millones de años, caminaba erguido por las copas de los árboles. Sin embargo, se desconoce su relación exacta con los homininos.

Para facilitar las comparaciones, se han reconstruido los pies de algunos homininos y otros se muestran invertidos, para que todos correspondan a un pie derecho.

DINO PULERÀ (*ilustraciones de los pies*) Y JEN CHRISTIANSEN




JOHN READER PARA SCIENCE SOURCE (*izquierda*) Y JEREMY DESILVA (*derecha*)

EN COMPARACIÓN con las pisadas del yacimiento G de Laetoli (*izquierda*), que se acepta que corresponden a *A. afarensis*, las del yacimiento A (*derecha*) son más cortas y anchas; además, el dedo gordo está desplazado hacia un lado.

chimpancé respecto de las mías. No quiere decir eso que las huellas del yacimiento A sean iguales que las de un chimpancé, sino que su forma es muy distinta de las de la especie a la que pertenecía Lucy. Comparadas con las huellas de G y S, que supuestamente son de *A. afarensis*, las del yacimiento A son cortas y anchas, el dedo gordo está un poco desplazado hacia un lado y hay indicios de que la porción media del pie era más flexible.

En el artículo en el que describimos estos hallazgos, publicado en diciembre de 2021 en la revista *Nature*, aseguramos que las huellas del yacimiento A no solo pertenecen a un hominino, sino que además demuestran que en Laetoli hubo una segunda especie. Como ocurre de ordinario en ciencia, no todos nuestros colegas están de acuerdo: algunos opinan que no hemos encontrado otra cosa que unas huellas más de *A. afarensis*. Pero conviene insistir: las huellas del yacimiento A son tan diferentes de las del australopiteco del yacimiento G que los especialistas estuvieron convencidos, durante décadas, de que eran las pisadas de un oso.

Tengo el convencimiento de que, poco después de que lloviese ceniza del cielo, hace 3,66 millones de años, dos tipos de homininos, cuya marcha y cuyos pies eran ligeramente distintos, migraron en dirección norte hacia la garganta de Olduvai, en Tanzania, quizá en busca de agua. Como la capa de Laetoli donde están impresas las huellas representa apenas unos días de actividad, es la mejor prueba que tenemos de que diferentes especies de homininos no solo fueron contemporáneas durante el Plioceno, sino que además compartieron el mismo hábitat. Cómo interactuaron, si es que lo hicieron, nadie lo sabe.

Pies de piedra

El redescubrimiento de las huellas en el yacimiento A de Laetoli y nuestra conclusión de que se trata de una segunda especie refuerzan los datos, cada vez más numerosos, que indican que la evolución del bipedismo fue mucho más compleja e interesante de lo que habíamos creído, y mucho menos lineal. Los otros datos no proceden de las huellas, sino de los restos corpóreos de los propios homininos. En el registro fósil humano es

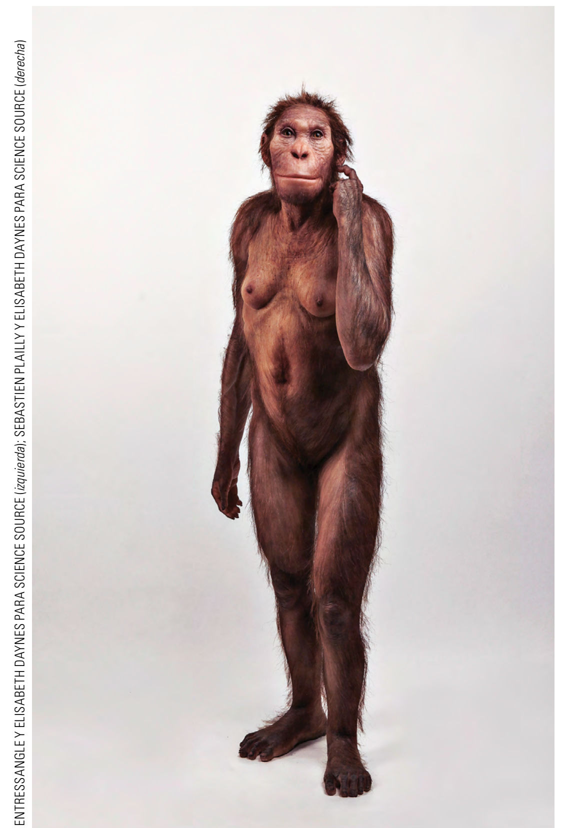
poco frecuente encontrar huesos podales, y menos aún la osamenta completa de un pie. Por eso es tan reseñable que, en los últimos dos decenios, los paleontólogos que trabajan en el valle del Rift y en las cuevas de Sudáfrica hayan cuadruplicado la cantidad de fósiles de esta extremidad, la única de un bípedo que normalmente está en contacto directo con el suelo. Muchos de estos descubrimientos se remontan a una época fundamental para la evolución humana, entre cinco y tres millones de años atrás, cuando nuestros ancestros apostaron sin reservas por la bipedestación. En 2017, McNutt y yo formamos equipo con Bernhard Zipfel, un podólogo reconvertido en paleoantropólogo de la Universidad de Witwatersrand, en Sudáfrica, para sacar algo en claro.

Concretamente, nos propusimos reevaluar, a la luz de los nuevos fósiles, los conocimientos asentados hasta entonces. Según la idea tradicional, el pie de los primeros homininos era parecido al del chimpancé, idóneo para prenderse de las ramas de los árboles. Este pie evolucionó a una forma intermedia, con igual capacidad de caminar y de asir, como el del fósil bautizado Ardi, una *Ardipithecus ramidus* que vivió en Aramis (Etiopía) hace 4,4 millones de años. De ahí saltamos a Lucy, la *A. afarensis* que vivió en Hadar (Etiopía) hace 3,2 millones de años, que



SHIRLEY RUBIN

DECENIOS DESPUÉS de descubrirse las huellas del yacimiento A, los científicos regresaron a Laetoli para volver a estudiarlas. Aunque las lluvias estacionales tienden a erosionar las pisadas, en este caso las habían protegido con una fina capa de sedimento.





S. ENTRESSANGLE Y ELISABETH DAYNES PARA SCIENCE SOURCE (*izquierda*); SEBASTIEN PLAILLY Y ELISABETH DAYNES PARA SCIENCE SOURCE (*derecha*)

ANDARES DISTINTOS: Aun después de que aparecieran especies que ya caminaban a la usanza humana moderna, siguieron evolucionado distintos estilos de marcha bípeda. *Australopithecus sediba* (*izquierda*) tenía adaptaciones que le permitían desplazarse por el medio arbóreo y el terrestre; el diminuto *Homo floresiensis* (*derecha*) tenía los pies anchos y planos, que probablemente le obligaban a dar pasitos cortos y elevados.

tenía el talón grande y el mesopié rígido, mejor adaptados a la vida sobre una superficie plana. Con el surgimiento del género *Homo*, al que pertenecemos nosotros, alrededor de un millón de años después, el pie se adecuó todavía más a la locomoción terrestre: se acortaron los dedos y se elevó el empeine.

Después de estudiar todos los fósiles de pies conservados con primor en los museos de media África, nuestros datos apuntaban en otra dirección. A raíz de la bipedación, se produjo una intensa experimentación evolutiva que configuró diferentes morfologías podálicas en las diversas especies. En el lapso de dos millones de años que estudiamos, encontramos cinco modelos de pie que posiblemente se correspondan con sendas maneras de caminar. Entre los dos extremos cronológicos de este período, que son Ardi y Lucy, hay otros tres modelos. El primero pertenece a una criatura parecida a Ardi, más o menos de la misma antigüedad, procedente de Gona (Etiopía); el segundo es de un hominino de 3,67 millones de años de Sterkfontein (Sudáfrica), apodado *Little Foot* («piecitos»); y el tercero se halló en el yacimiento de Burtele, en Woranso-Mille (Etiopía), tiene 3,4 millones de años y es muy primitivo. Los cinco modelos poseen rasgos de simio y de humano, pero cada uno en una combinación completamente diferente, y no siguen la tendencia predecible por la cual serían más humanos y menos simiescos con el paso del tiempo.

Como en una versión prehistórica del cuento de *La Cenicienta*, quizás uno de estos pies encaje algún día con las enigmáticas huellas de Laetoli y así conozcamos la identidad de quien las imprimió. Veremos qué nos depara la exploración de esta etapa primigenia de nuestra evolución.

Diversidad sostenible

Tal diversidad locomotriz no se limita a los primeros capítulos de la evolución humana. Tenemos, por ejemplo, *Australopithecus sediba*, cuyo

descubrimiento fortuito en 2008 rivaliza con la batalla de boñigas entre los mitos de la ciencia paleoantropológica. Este homínino, de casi dos millones de años de antigüedad, lo descubrió por casualidad un niño. Matthew Berger, de nueve años, tropezó con una piedra que contenía una clavícula y una mandíbula mientras buscaba fósiles en la cueva de Malapa, en el yacimiento sudafricano de la Cuna de la Humanidad, junto con su padre, el paleoantropólogo Lee Berger de la Universidad de Witwatersrand. En los meses siguientes, Berger y su equipo abrieron los muros fosilíferos de la cueva y encontraron dos esqueletos incompletos de una nueva especie que denominaron *A. sediba*. Berger me invitó a estudiar el pie y las piernas poco después de terminar mi doctorado.

Lo que vi me dejó patitieso. La forma de los huesos no encajaba. Para un homínino de esa época, el calcáneo era demasiado simiesco; además, los metatarsos, el astrágalo, la rodilla, la pelvis y la columna lumbar tenían rasgos extraños en ambos esqueletos. Por separado, estos huesos son muy raros, pero en concierto cuentwan la historia de un homínino que caminaba de manera muy particular, parecida a la de las personas hiperpronadoras de hoy, que vuelcan el peso sobre el borde interno del pie. Esta alteración de la marcha puede provocar patologías en los humanos actuales, pero Berger y yo interpretamos la forma de los huesos de *A. sediba* como las soluciones anatómicas a los problemas que sufre una persona cuando camina así. O sea, creemos que esa especie estaba adaptada a ese tipo de marcha. ¿Por qué? Los hombros y los brazos de *A. sediba* indican que eran trepadores, en tanto que los dientes conservan restos microscópicos de células vegetales de hojas, frutas y cortezas, lo cual demuestra que se subían a los árboles para alimentarse. Esa forma de andar era la adaptación precisa de una criatura que vivía entre los dos mundos, en el suelo y en las copas de los árboles, mucho después de que otras especies de homíninos se hubiesen decidido por la vida en tierra firme.

A. sediba no es el único homínino que deambulaba por el África meridional hace dos millones de años. En 2020, un equipo dirigido por Andy Herries, de la Universidad La Trobe, en Melbourne, publicó el descubrimiento de unos fósiles en las cuevas de Drimolen, igualmente situadas en la zona de la Cuna. Los fósiles corresponden a otras dos especies de homíninos: *Paranthropus robustus*, de fuerte dentadura, y *H. erectus*, mucho más parecido al ser humano. Dicho de otro modo, coexistieron homíninos de tres géneros distintos: *Homo, Paranthropus y Australopithecus*.

Gracias al esqueleto incompleto descubierto en la década de 1980 en la ribera occidental del lago Turkana, en Kenia, sabemos que el cuerpo de *H. erectus* era prácticamente idéntico al de los humanos modernos. Las pisadas encontradas en la ribera oriental, por su parte, confirman que también caminaba como nosotros. Al otear el paisaje, *H. erectus* (probable ancestro de nuestra especie, *H. sapiens*) habría avistado otros dos bípedos de sendos géneros: los australopitecos y los parántropos. Dadas las diferencias morfológicas de los huesos de los pies y las piernas, creo que cada uno de ellos caminaba con un estilo particular.

Los distintos estilos de marcha persistieron mucho después de que se extinguieran los australopitecos y los parántropos. Hace todavía 60.000 años, cuando *H. sapiens* ya estaba bien establecido, los pequeños homíninos de la especie *Homo floresiensis*, popularmente llamados hobbits, pululaban por su isla natal de Flores, en el archipiélago indonesio. Eran paticortos, tenían articulaciones pequeñas y los pies grandes y chatos. Me pregunto si esta complexión se traduciría en el andar propio de quien lleva raquetas de nieve: pasitos cortos y marcada elevación de la rodilla.

Quizá, las diferencias en la forma de caminar ayudaban a los homíninos a saber si los grupos que veían en la distancia pertenecían a su misma especie. En tal caso, ¿distinguían también a sus familiares y allegados? Esta habilidad habría sido crucial para evitar conflictos y reyertas. La marcha, por lo que parece, es más que un mecanismo de locomoción.

Preguntas abiertas

Quedan muchos interrogantes por resolver sobre la evolución del bipedismo. Todavía no sabemos por qué supuso una ventaja selectiva para los

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Nuestra historia evolutiva*, monográfico que recoge los mejores artículos de *Investigación y Ciencia* sobre los hallazgos paleontológicos más recientes que han hecho cambiar el relato de nuestro intrigante pasado.



primeros homininos y para las posteriores especies que se extinguieron. Ha habido infinidad de hipótesis. En 1809, el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck conjeturó que los humanos habían adquirido la bipedestación para ver por encima del herbaje más alto. Sesenta años después, Charles Darwin dedujo que caminar a dos patas nos liberó las manos para empuñar herramientas. También se ha planteado que permitió recolectar y transportar los alimentos o vadear cursos de agua. Por otro lado, se ha dicho que ofrecía mayor ahorro energético a la hora de desplazarse entre recursos dispersos. A mí me parece que intentar encontrar una única razón es una tarea absurda. Es muy posible, quizás incluso probable, que el bipedismo surgiese varias veces en la base del árbol filogenético de los homininos, tal vez por motivos distintos y en los variados entornos naturales del continente africano. La diversidad morfológica de los pies fósiles del Plioceno abona esta hipótesis.

El registro fósil de los simios antropomorfos del Mioceno (entre 23 millones y 5,3 millones de años atrás) suscita otros interrogantes. A los paleoantropólogos que trabajan en África les cuesta mucho hallar fósiles de este período tan trascendental, cuando los homininos se separaron de los demás simios. En cambio, en la Europa meridional se ha reunido un conjunto imponente de huesos de simios antropomorfos que vivieron en los territorios actuales de España, Francia, Alemania, Grecia, Italia, Hungría y Turquía. A juzgar por las manos, los brazos, la espalda, la cadera y las piernas, estos simios europeos no caminaban apoyándose en los nudillos, como los chimpancés, sino que se habrían movido sobre dos patas con mayor soltura y eficiencia que los simios africanos de hoy; uno de ellos es *Danuvius guggenmosi*, hallado en Alemania y anunciado en 2019. Según el nivel que ocupase en el árbol filogenético, es posible que el simio antecesor de humanos, chimpancés y gorilas no se apoyase nunca sobre los nudillos de las manos, sino que «caminase» más erguido por entre los árboles y presentase un bipedismo con asistencia manual. En ese caso, la adaptación especial de los homininos no sería el bipedismo en sí, sino la marcha bípeda sobre el suelo. Si esta hipótesis se ve respaldada por nuevos fósiles, resultará que ese bipedismo rudimentario no fue una novedad locomotriz, sino una antigua innovación aprovechada para la mudanza a un entorno diferente: el paso de una vida arborícola a una vida terrestre.

Esta idea es polémica y hay que estudiarla mejor. La dificultad estriba en que hace falta hallar en África fósiles de pies o piernas de la época exacta en que empezaban a divergir los linajes que llevarían luego a los humanos, los chimpancés y los gorilas, hace entre 12 y 7 millones de años. Ese hueco lo rellenamos toscamente con la anatomía de los simios antropomorfos hallados en el sur de Europa. Es como reconstruir la fisonomía de una bisabuela con los jirones de unas fotos en blanco y negro de unos primos terceros que vivieron en el siglo XIX. Nos darán unas pistas, pero no el retrato completo. Tendremos que ver si la hipótesis sigue siendo válida en las próximas décadas a medida que se recuperen más fósiles de la cuenca mediterránea y de África. Por ahora, el origen último de la bipedación sigue siendo un misterio.

Fuera como fuera, desde que nuestros antepasados arrancaron a andar sobre dos piernas, el viaje se ha prolongado hasta el día de hoy. A lo largo de la vida, una persona da 150 millones de pasos, es decir, tres vueltas a la Tierra. Los humanos callejeamos, campamos, circulamos; desfilamos, discurrimos, divagamos; paseamos, pisamos y peregrinamos. Después de andarnos con pies de plomo, le pedimos a alguien que no se ande con rodeos. Es un héroe el caballero andante; un pícaro, el que vuelve a las andadas. Pero rara vez caminamos de forma consciente. Es una acción, podríamos decir, un tanto pedestre. Los fósiles, en cambio, nos muestran algo radicalmente distinto, porque caminar no tiene nada de ordinario. Es un experimento de la evolución, complejo y sofisticado, que partió de unos humildes primates del Mioceno y acabó llevándonos a recorrer el mundo entero.

Jeremy DeSilva es paleoantropólogo y profesor en el Colegio Universitario de Dartmouth (Nueva Hampshire, Estados Unidos). Investiga la evolución del bipedismo. Ha escrito el libro *First steps: How upright walking made us human* (Harper Collins, 2021).

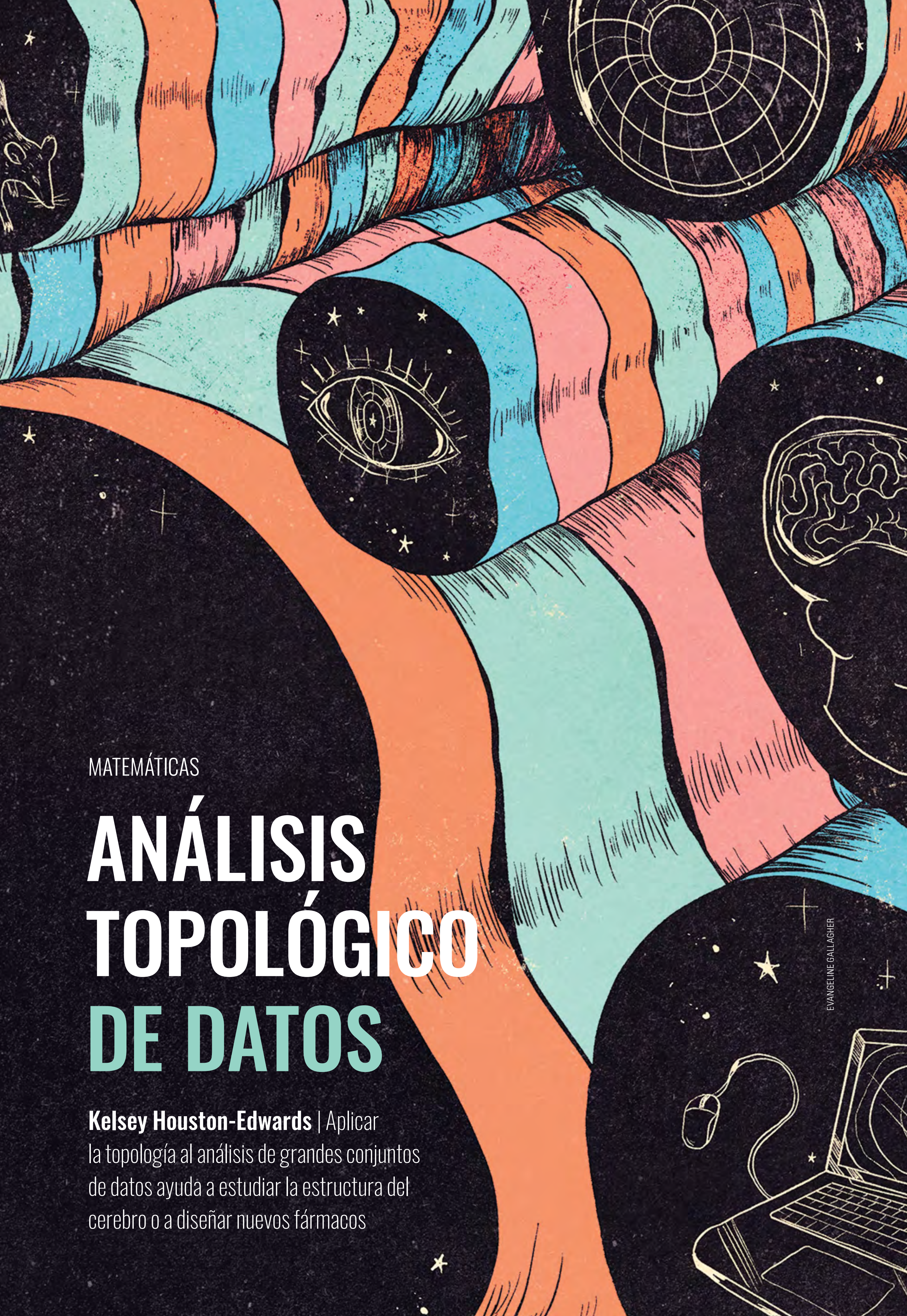


EN NUESTRO ARCHIVO

La hija de Lucy. Kate Wong en *IyC*, febrero de 2007.

Nuevas pistas sobre el origen del bipedismo. Tracy L. Kivell en *IyC*, marzo de 2020.

El rompecabezas del origen humano. Kate Wong en *IyC*, noviembre de 2021.



MATEMÁTICAS

ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE DATOS

Kelsey Houston-Edwards | Aplicar la topología al análisis de grandes conjuntos de datos ayuda a estudiar la estructura del cerebro o a diseñar nuevos fármacos

EVANGELINE GALLAGHER

Benjamin Adric Dunn, científico de datos en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, me muestra una imagen formada por puntos espaciados de manera irregular, cuya disposición recuerda vagamente a las piedras de Stonehenge. La pauta general es clara, al menos para un ser humano. «Al mirarlo, resulta obvio que se trata de un círculo», señala. Pero es probable que un algoritmo tuviera dificultades para reconocer esa forma simple. «Muy a menudo, les falta la visión de conjunto.»

Muchos procesos científicos incluyen bucles, o repeticiones. La incapacidad de un ordenador a la hora de captar tales relaciones supone un problema para los científicos que quieren identificar patrones circulares en grandes volúmenes de datos. Los datos se suelen visualizar mediante puntos que flotan en el espacio, igual que estrellas en el cielo nocturno. Un punto podría denotar una posición física, como los dos números que marcan la longitud y la latitud de un barco en alta mar. De modo parecido, los genes se pueden representar en un espacio matemático de muchas dimensiones (a veces centenares), de modo que dos genes con secuencias de ADN similares estarán simbolizados por puntos próximos entre sí [*véase* «Redes de genotipos: los senderos de la evolución», por Susanna Manrubia y José Cuesta; Investigación y Ciencia, abril de 2020]. El significado de una pauta circular en los datos depende del contexto: si hablamos de la ubicación de un barco, los círculos podrían indicar que se ha perdido, mientras que en el caso de datos genéticos quizá reflejen una relación evolutiva.

Con frecuencia, los datos forman cielos estrellados tan complejos y multidimensionales que no es posible estudiarlos a simple vista: si uno quiere detectar círculos, necesita un conjunto de instrucciones lo bastante precisas para que las entienda un ordenador. Pero las técnicas de análisis de datos suelen basarse en el álgebra lineal, un área de las matemáticas que estudia rectas y planos. Para buscar bucles, en cambio, los investigadores recurren al análisis topológico de datos (ATD), un método que ofrece una perspectiva del todo distinta.

En contraste con las estructuras relativamente simples y rígidas que caracterizan el álgebra lineal, el ATD se apoya en la topología, una rama de las matemáticas que estudia formas plegables y extensibles. Como sus practicantes suponen que todas las formas poseen una flexibilidad arbitraria, la topología a menudo recibe el nombre de «geometría de la goma elástica».

EN SÍNTESIS

La topología, una rama de las matemáticas que estudia las propiedades de los objetos geométricos que permanecen inalteradas al deformarlos, se usa cada vez más para hallar patrones en grandes conjuntos de datos.

El método consiste en construir complejas redes multidimensionales a partir de los datos y analizarlas desde un punto de vista topológico, en busca de formas inusuales que revelen propiedades robustas del sistema.

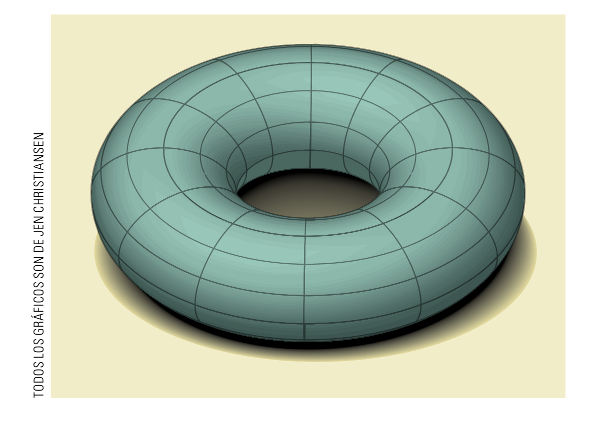
Dicho enfoque se ha empleado en diversas aplicaciones, desde el diseño de nuevos fármacos hasta el descubrimiento de procesos biológicos periódicos o del modo en que las neuronas representan el espacio.

El ATD ayuda a los matemáticos a construir figuras reveladoras a partir de puntos dispersos, como si trazaran constelaciones sobre las estrellas. Para ello, empiezan usando los datos como nodos o articulaciones de un andamiaje virtual, construyendo estructuras complejas que pueden extenderse a través de cientos de dimensiones. La imagen resultante contiene la esencia de los datos originales, pero de una forma más tangible. Esas estructuras se estudian desde un punto de vista topológico, buscando propiedades que se mantengan incluso si se dobla o estira el andamiaje.

La utilidad de la topología para el análisis de datos reside en su capacidad de revelar propiedades cualitativas, más que cuantitativas. Identifica los aspectos de la estructura que persisten aunque haya errores aleatorios, o ruido, en las mediciones subyacentes. El ruido a menudo perturba los datos, pero la topología sigue siendo la misma y desvela características robustas del sistema. «En muchas situaciones reales, disponemos de datos inexactos», apunta Robert Ghrist, matemático de la Universidad de Pensilvania. «Así que debemos emplear matemáticas flexibles.»

Los matemáticos y otros científicos trabajan juntos para hallar formas topológicas inusuales en grandes conjuntos de datos, las cuales pueden representar cualquier cosa, desde procesos biológicos con frecuencia diaria hasta la estructura molecular de un fármaco. Quizá la más fascinante de esas investigaciones es la que se refiere a la estructura cerebral. La topología ha servido para explorar cómo interactúan las neuronas a través de áreas extensas del cerebro, en

respuesta a distintos ambientes y estímulos. En colaboración con neurocientíficos, Dunn ha descubierto que ciertas neuronas usan un toro, el equivalente matemático de la superficie de una rosquilla, para obtener un mapa de su entorno.

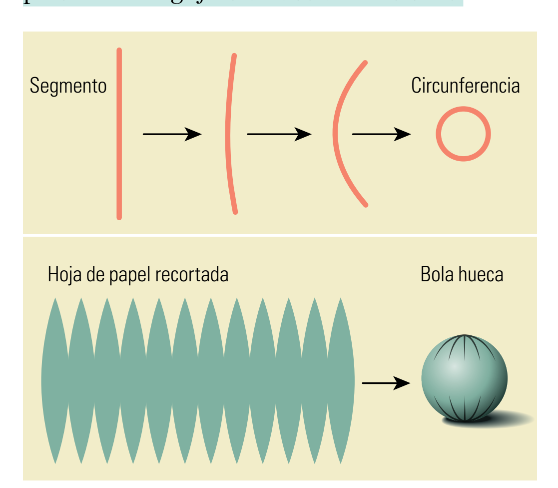


TODOS LOS GRÁFICOS SON DE JEN CHRISTIANSEN

Rosquillas y tazas de café

Aunque los topólogos se dedican a deformar láminas de goma, tienen mucho cuidado de no cambiar el número de agujeros que hay en ellas: nunca abren un nuevo agujero ni cierran uno existente. Según un clásico chiste matemático, un topólogo no sabe distinguir una rosquilla de una taza de café, porque ambas poseen un agujero.

Los topólogos clasifican los agujeros según su dimensión. Un bucle cerrado, como la cifra 0, tiene un agujero de una dimensión porque se forma uniendo los extremos de un segmento unidimensional. Partiendo de un plano bidimensional, como una hoja de papel, y pegando los bordes se obtiene algo parecido a una bola hueca, que presenta un agujero de dos dimensiones.

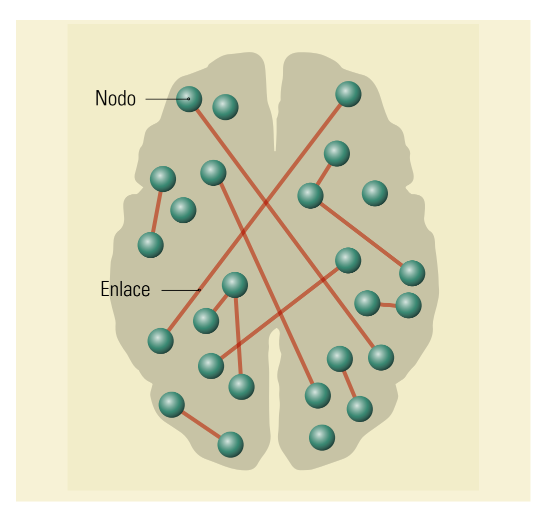


Las figuras con más dimensiones pueden tener agujeros de dimensión más alta. Así, por analogía con los agujeros uni- y bidimensionales, un agujero tridimensional se forma «cerrando» un espacio de tres dimensiones, como un cubo. Pero este proceso solo se puede visualizar desde una perspectiva tetradimensional, algo que no está al alcance de casi nadie —seguramente de nadie—.

Algunas formas tienen varios agujeros de distintas dimensiones, como esas bolas hinchables con un asa donde se sientan y saltan los niños. El interior hueco de la bola es un agujero bidimensional, y el asa sólida forma uno unidimensional. La topología dispone de muchos métodos precisos para contar agujeros en figuras de dimensiones altas, una capacidad que se ha mostrado útil para estudiar la actividad neuronal del cerebro.

El neurocientífico Olaf Sporns, de la Universidad de Indiana, concibe el cerebro como una enorme red de transporte, cuyas vías e infraestructuras se componen de las neuronas y las sinapsis que las conectan. Las señales eléctricas y químicas del cerebro circulan por esas avenidas. «Las vías físicas restringen los patrones de circulación dinámicos que podemos observar», comenta Sporns. Y esas pautas de circulación cambian a medida que nos movemos y pensamos.

Podemos dibujar un esquema del cerebro como una colección de puntos que representan neuronas. Algunos de los puntos están unidos por líneas, que denotan una sinapsis entre las correspondientes neuronas. Los matemáticos se refieren a este tipo de estructura como un grafo: una colección de nodos conectados por enlaces, o aristas. El grafo no recrea la complejidad biológica del cerebro, pero retiene la forma general de los circuitos. Este es un compromiso habitual en los modelos matemáticos, que tratan



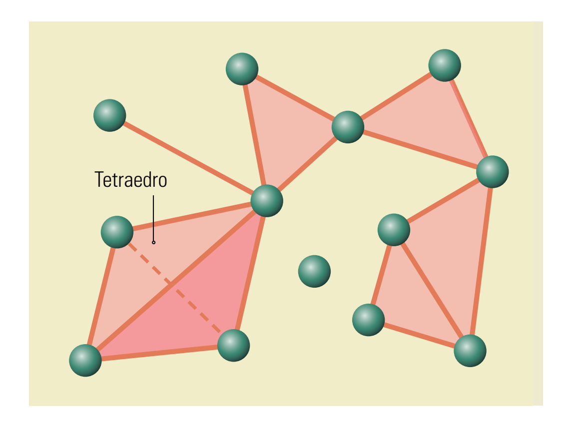
de compaginar la simplicidad y analizabilidad con la utilidad.

El grafo de las conexiones neuronales recuerda a una telaraña: las neuronas son abundantes y están muy entrelazadas. En 2017, Kathryn Hess, matemática de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, abordó esa complejidad haciendo algo sorprendente: complicar aún más el grafo. Analizó datos del proyecto Blue Brain, una enorme simulación por ordenador de la actividad de la neocorteza (una parte del cerebro relacionada con las funciones superiores) de un roedor. El modelo informático contiene representaciones de las neuronas, que están conectadas mediante sinapsis a otras neuronas simuladas. Esos enlaces, así como sus condiciones de activación, vienen determinados por principios biológicos básicos y por datos obtenidos en experimentos con roedores.

La simulación puede mostrar las pautas de circulación cerebrales, es decir, la activación de las neuronas en respuesta a los estímulos. Pero, a diferencia de lo que ocurre con una vista real del cerebro, es posible pausar la simulación y obtener una imagen congelada que muestre qué sinapsis se activan para un estímulo dado. Es fácil convertir esa imagen estática en un grafo, ya que indica los puntos de datos y las líneas que los unen: dos neuronas están conectadas si la sinapsis que va de una a otra está activada. A partir de esta imagen, Hess construyó lo que los matemáticos llaman un complejo simplicial, transformando el sencillo grafo en una figura con volumen.

Los complejos simpliciales están compuestos por triángulos de distintas dimensiones. En el grafo de Blue Brain, por ejemplo, tres neuronas conectadas por sinapsis activas formaban los vértices de un triángulo hueco. Para convertir esa estructura en un complejo simplicial, los matemáticos colorearon ese triángulo hueco con un triángulo bidimensional macizo. De modo similar, usaron formas de dimensión más alta análogas a triángulos para rellenar grandes grupos de neuronas conectadas. Así, un tetraedro, una pirámide tridimensional maciza con cuatro caras triangulares, rellenaría un grupo de cuatro neuronas que se activan a la vez.

Los autores no observaron más de ocho neuronas activándose en grupo, de modo que la pieza más grande de ese complejo simplicial era un triángulo de siete dimensiones. Los elementos se superponían, formando una escultura multidimensional: un triángulo podía sobresalir de un tetraedro y estar unido por un vértice a otro triángulo. Además, los científicos y matemáticos no



examinaron una sola imagen congelada, sino toda una serie de ellas, obtenidas tras simular un golpe suave en los bigotes del roedor. Convirtieron cada uno de esos mapas en un complejo simplicial y utilizaron las herramientas de la topología para analizar cómo cambiaba su forma con el tiempo.

Hess y sus colaboradores también realizaron experimentos (tanto in vitro como simulados) con grupos de hasta 12 neuronas. Justo después de recibir el estímulo, los complejos simpliciales crecían como una enorme construcción de Lego, añadiendo piezas de dimensiones más y más altas hasta que la escultura alcanzaba un máximo de tres o cuatro dimensiones, dependiendo del estímulo. Y, entonces, todo desaparecía de pronto. «Vemos esas estructuras cada vez más complejas que son creadas por el estímulo, hasta que todo colapsa sin más», describe Hess.

Para un topólogo, tres segmentos unidos en un triángulo son lo mismo que una circunferencia, porque es posible transformar una figura en la otra. Como los complejos simpliciales que construyó el equipo de Hess a partir de los cerebros de roedor simulados son heptadimensionales, pueden tener agujeros de hasta siete dimensiones. Su análisis mostró que, conforme crecía la figura, aumentaba el número de agujeros. En su máximo, la estructura contenía una cantidad sorprendentemente alta de agujeros de dos y tres dimensiones, muchos más de los que se observarían en un complejo simplicial aleatorio o en uno derivado de otro proceso biológico. La distribución concreta de los agujeros reveló un alto nivel de organización en la respuesta neuronal, una complejidad que tal vez refleje un rasgo fundamental de los procesos mentales.

Agujeros pertinaces

Sin embargo, lo más habitual es que los datos estén representados por puntos aislados que flotan en un espacio matemático abstracto, sin conexiones claramente preestablecidas. Si queremos aplicar el ATD, hay que averiguar cómo conectarlos, pero existen muchas maneras posibles de unir estrellas para formar una constelación. Los topólogos encuentran esas imágenes implícitas por medio de una técnica conocida como homología persistente, analizando una sucesión de complejos simpliciales construidos a varias escalas para determinar los aspectos esenciales de la nube de datos.

A fin de crear el primer complejo simplicial, extienden la red más amplia posible, conectando cada punto con todos los demás para formar una malla densa. Rellenando esa telaraña con figuras macizas se obtiene un complejo simplicial de dimensión alta con pocas características apreciables. Pero los matemáticos necesitan comparar ese complejo con los que resultan de conectar los datos a escalas más pequeñas. Así que, a continuación, extienden una red más reducida sobre los mismos datos, uniendo solo los puntos próximos, y usan esa telaraña menos densa para construir un segundo complejo simplicial. Como esta malla posee menos puntos, su complejo simplicial contiene formas de dimensiones más bajas. Los investigadores repiten el proceso con una serie de redes más pequeñas. «A cada escala, se obtiene una instantánea diferente del aspecto de ese complejo», explica Ranthony Edmonds, matemática de la Universidad Estatal de Ohio.

Cada complejo simplicial es una posible constelación formada a partir de los mismos datos dispersos. Los topólogos estudian ese espectro de formas, registrando el número de agujeros en cada dimensión. Les interesan sobre todo aquellos agujeros que persisten a muchas escalas distintas. Algunos agujeros aparecen y al poco se desvanecen, pero los agujeros «pertinaces», aquellos que subsisten a varias escalas, reflejan los rasgos más esenciales de los datos. Así pues, el ATD puede convertir un complicado barullo de datos en una sencilla lista de agujeros pertinaces, un proceso muy parecido a la compresión de una imagen en un fichero JPEG. «Es una manera de reducir los datos a lo que realmente importa, para tener algo mucho más manejable», afirma Ghrist.

En ocasiones, los agujeros identificados de ese modo tienen interpretaciones directas. José Perea, matemático de la Universidad del Nordeste de EE.UU., y un equipo de biólogos computacionales emplearon la homología persistente para descubrir procesos biológicos periódicos (como el ciclo metabólico de la levadura o el ritmo circadiano de un ratón). «¿Qué es la recurrencia o la repetición?», se pregunta Perea. «Desde un punto de vista geométrico, debería ser como si recorriéramos algún tipo de bucle en el espacio de aquello que estamos observando.»

El ATD también ha ayudado a diseñar nuevos fármacos. Esos compuestos a menudo se encuentran modificando la estructura molecular de medicamentos que ya existen. Pero esa estructura es muy compleja y difícil de analizar, incluso para los algoritmos de aprendizaje automático. A fin de diseñar medicamentos novedosos, los ordenadores necesitan trabajar con representaciones simplificadas de las moléculas actuales. Hay muchas formas de hacerlo, pero el equipo de Guowei Wei, de la Universidad Estatal de Míchigan, optó por reducir cada molécula a su «firma topológica». Dicha firma es una descripción de la sustancia basada en sus propiedades topológicas: en esencia, la información obtenida a través de la homología persistente, como el número de agujeros pertinaces en cada dimensión.

Bucles cerebrales

La aplicación más atractiva del ATD podría hallarse en el nivel más básico de la organización cerebral: un único tipo de neurona. En 2014, John O'Keefe y sus colegas May-Britt Moser y Edvard Moser recibieron el Nobel de medicina por descubrir, respectivamente, las neuronas de ubicación y de retícula (también llamadas «de red» o «de rejilla»), que se activan cuando un animal está en lugares específicos. Actúan como sensores de posición, según Carina Curto, matemática de la Universidad Estatal de Pensilvania.

Con objeto de establecer la relación entre las neuronas de retícula y la posición de una rata, los neurocientíficos escogieron una sola de esas células y dibujaron puntos en un modelo informático del suelo para señalar donde se encontraba el animal cada vez que se activaba. A medida que la rata se movía libremente en una caja cuadrada, fue apareciendo una pauta regular y repetitiva de puntos (en concreto, una red hexagonal) que representaban todas las ubicaciones donde se activaba esa neurona. Repitieron el mismo proceso para varias neuronas de retícula, marcando cada una de ellas con un color distinto. Los puntos correspondientes a cada neurona de

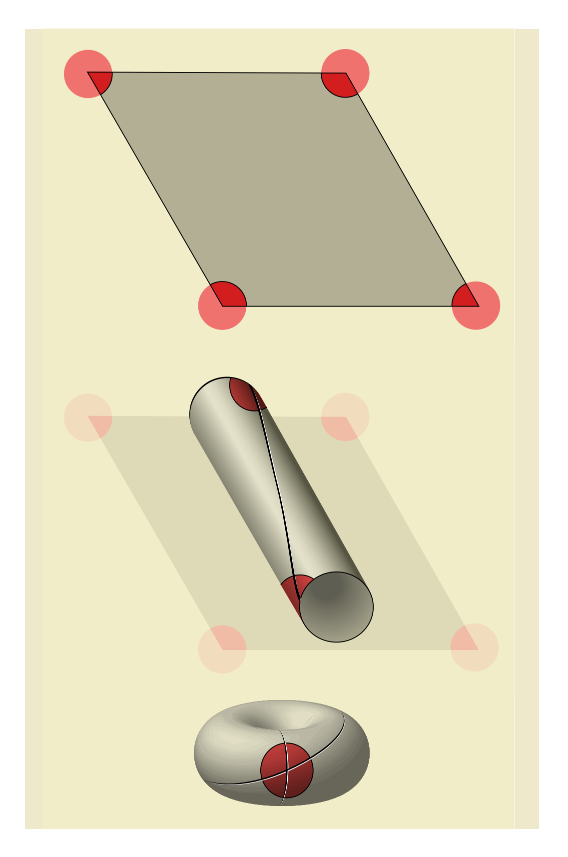
retícula presentaban la misma pauta geométrica, pero esos patrones estaban desplazados unos con respecto a otros y recubrían la caja como un embaldosado.

FUENTE: «WHAT CAN TOPOLOGY TELL US ABOUT THE NEURAL CODE?», CARINA CURTO EN *BULLETIN OF THE AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY*, VOL. 54, PÁGS. 63-78, ENERO DE 2017 (*referencia*)

Cuatro neuronas de retícula distintas (*rojo, rosa, azul y verde*); cada una se activa en una red periódica de puntos.

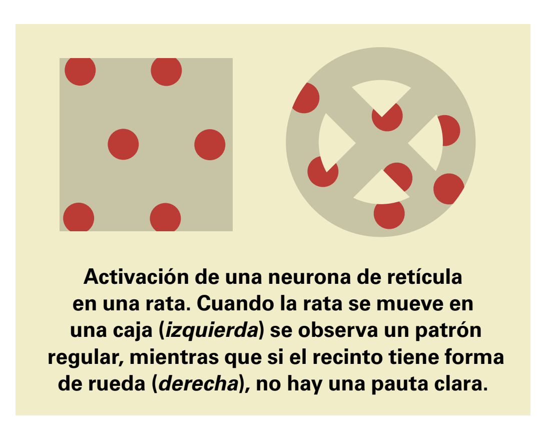
Los neurocientíficos querían comprender el modo en que las neuronas de retícula representaban las ubicaciones espaciales: básicamente, buscaban la plantilla que producía la pauta hexagonal. Por ejemplo, imaginemos un sello de goma cilíndrico, con varios personajes de dibujos animados grabados en él. Al rodar, el cilindro creará una franja donde aparecerá a intervalos regulares la imagen del ratón Mickey. Pero todas esas imágenes provienen del mismo punto del sello original. Si bien es fácil imaginar este proceso, la pregunta inversa resulta más peliaguda: ¿cómo podemos recrear la plantilla (el sello cilíndrico) a partir del patrón que ha generado?

En el embaldosado de puntos de colores que denotan dónde estaba la rata cuando se activó cada neurona de retícula, cuatro puntos rojos vecinos forman los vértices de un paralelogramo, una especie de rectángulo inclinado. Como en el caso de las imágenes del ratón Mickey, todos los puntos rojos corresponden a una neurona concreta. Así que los topólogos identificaron entre sí todos los puntos rojos, doblando el paralelogramo para formar una rosquilla mediante una operación de «pegado». Primero, unieron dos lados opuestos del paralelogramo, generando así un cilindro con dos puntos rojos, uno arriba y otro abajo. Luego, doblaron el cilindro, pegando los dos extremos para formar un toro. De este modo, los cuatro vértices rojos del paralelogramo se convierten en un solo punto sobre la rosquilla. Sobre ese toro aparecerá un punto,



y solo uno, de cada color. Por lo tanto, igual que el sello de goma cilíndrico era la plantilla para la franja de dibujos, un toro es el mapa correcto para entender la manera en que las neuronas de retícula representan el suelo de la caja.

Los neurocientíficos observaron ese patrón cuando la rata se movía en una caja. Pero era más difícil apreciarlo cuando la rata se movía en recintos con otras formas, como la de una rueda de bicicleta con radios unidos en el centro. Cada neurona seguía activándose en varias posicio-



Activación de una neurona de retícula en una rata. Cuando la rata se mueve en una caja (*izquierda*) se observa un patrón regular, mientras que si el recinto tiene forma de rueda (*derecha*), no hay una pauta clara.

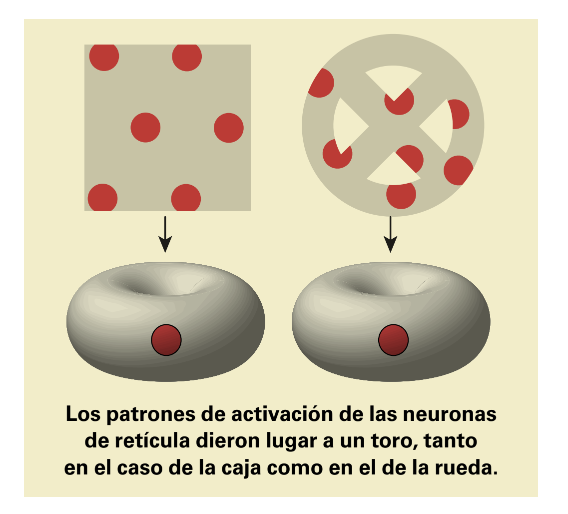
nes, pero los investigadores no estaban seguros acerca del mapa subyacente: la disposición de los puntos no mostraba una estructura clara.

En un artículo publicado en *Nature* en febrero de 2022, un equipo de matemáticos y neurocientíficos, entre ellos Dunn, usaron las neuronas de retícula para poner a prueba una teoría basada en la noción de red de atractores continuos. Dicha teoría predice que ciertas neuronas están conectadas según un patrón concreto, y que este no cambia aunque el animal se halle en una situación distinta. Para verificarla, los investigadores necesitaban determinar si las neuronas de retícula siempre forman un toro, con independencia del entorno en que se encuentre la rata. Buscaban toros en un barullo de datos neurológicos, el trabajo perfecto para el ATD.

La forma toroidal parece inherente al modo en que las neuronas representan el espacio

Esta vez, en lugar de marcar las posiciones donde se activaba una determinada neurona de retícula, los autores estudiaron el comportamiento colectivo de toda una red de esas neuronas. Para ello, registraron el estado de la red a intervalos regulares, utilizando una secuencia de ceros y unos que indicaba si cada neurona de retícula estaba activa o no. Matemáticamente, esa larga secuencia es un punto en un espacio de dimensión muy alta. Al determinar el estado del sistema en diversos instantes, los investigadores recopilaron puntos que describían la evolución de los patrones de activación de las neuronas de retícula, pero los datos eran demasiado complicados para estudiarlos a simple vista.

Después de usar algunas técnicas estándar para simplificar los datos, el equipo calculó la homología persistente del sistema, conectando los puntos a diferentes escalas y examinando los complejos simpliciales resultantes. Como antes, si la rata se movía en una caja, los datos formaban un toro. Pero la verdadera prueba llegó cuando generaron datos para un recinto con forma de rueda. Para su deleite, el resultado también fue un toro.



Los patrones de activación de las neuronas de retícula dieron lugar a un toro, tanto en el caso de la caja como en el de la rueda.

Los investigadores incluso lograron recoger datos de una rata que estaba durmiendo, y tal vez soñando. Y volvieron a obtener un toro, una forma que persistía sin importar el entorno o el estado de la rata. Ese hallazgo respalda la teoría de las redes de atractores continuos: la forma de rosquilla parece inherente al modo en que las neuronas de retícula representan el espacio.

Muchas de las aplicaciones del ATD dependen de nuevas y potentes herramientas computacionales. «Nada de esto habría sido posible si la gente no se hubiera tomado en serio el desarrollo de algoritmos», opina Vidit Nanda, matemático en la Universidad de Oxford. «Si no es eficaz o no puede implementarse a gran escala, nadie querrá utilizarlo, por bonita que sea la teoría.»

Gracias a estas técnicas, los usos de la topología, que hasta hace poco parecía solo una rama abstracta, aunque divertida, de las matemáticas, están en plena efervescencia. «Las aplicaciones se están tornando más y más potentes», asegura Gunnar Carlsson, matemático de la Universidad Stanford y uno de los pioneros del ATD. «Ha sido una auténtica revolución.»

Kelsey Houston-Edwards es matemática y periodista. Fue guionista y presentadora de la serie de vídeos divulgativos *Infinite Series*, producida por la red de televisión pública de Estados Unidos.



EN NUESTRO ARCHIVO

El GPS del cerebro. May-Britt Moser y Edvard I. Moser en *IyC*, marzo de 2016.
El mapa social del cerebro. Matthew Schafer y Daniela Schiller en *IyC*, abril de 2020.
La organización cerebral del pensamiento. Jacob L. S. Bellmund y Christian F. Doeller en *MyC*, n.º 108, 2021.

LA SUMA DE LOS PRIMEROS NÚMEROS NATURALES (II)

Algunas demostraciones conectan este sencillo problema aritmético con la combinatoria, la teoría de grafos o el análisis matemático

Bartolo Luque

En mi anterior columna, vimos que la famosa anécdota que cuenta cómo el joven Gauss sumó los cien primeros números naturales,

$$1 + 2 + 3 + \cdots + 100 = 5050,$$

es apócrifa. Pero, aunque no tengamos pruebas de que esa historia sea cierta, nos sirvió igualmente para ilustrar y comparar distintas maneras de obtener la suma de los primeros n números naturales,

$$T(n) = 1 + 2 + 3 + \cdots + n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

A partir de la prueba por «caligrama matemático» que suele acompañar a la anécdota (y que consiste en sumar el primer y último término, el segundo y el penúltimo...), discutimos el concepto de casualidad matemática y la diferencia entre las demostraciones que solo prueban un resultado, como las basadas en la inducción matemática, y aquellas que además lo explican, como los caligramas y las pruebas visuales. Estas últimas no se consideran demostraciones rigurosas, pero las pusimos en valor al mostrar que pueden clarificar el problema y señalar el camino hacia una prueba formal y rigurosa, que en nuestro caso conseguimos usando el formalismo de los sumatorios.



Los números tetraédricos se construyen a partir de los números triangulares del mismo modo que estos a partir de los naturales.

CAPTURELIGHT/ISTOCK

En esta segunda parte de la columna, continuaremos examinando otras formas en las que el pequeño Gauss podría haber obtenido la respuesta y discutiendo hasta qué punto resultan explicativas. Y, además, comprobaremos que reformular el problema nos permite encontrar su solución en varias áreas inesperadas de las matemáticas.

Demostraciones automáticas

Pero ¿qué quiero decir con «reformular»? Observemos que, si conocemos el valor de $T(n-1)$, bastará con sumarle n para obtener $T(n)$. Así, podemos expresar el problema de hallar la suma de los primeros números naturales mediante una ecuación de recurrencia,

$$T(n) = T(n-1) + n,$$

que tiene como solución dicha suma. Esta reformulación del problema abre la posibilidad de utilizar un sencillo algoritmo de demostración automática que permita a un ordenador deducir la fórmula de $T(n)$. Tal prueba constaría de los siguientes pasos:

0 Suministramos a nuestro algoritmo la ecuación de recurrencia, sujeta a la condición inicial $T(1) = 1$.

1 El algoritmo supondrá que $T(n)$ es una función polinómica de grado desconocido:

$$T(n) = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 + \cdots$$

y, por lo tanto, también que

$$T(n-1) = a_0 + a_1(n-1) + a_2(n-1)^2 + a_3(n-1)^3 + \cdots$$

2 Sustituyendo esas expresiones polinómicas en la ecuación de recurrencia, el algoritmo obtendrá una identidad de polinomios. Entonces, igualando los coeficientes del mismo grado y tras un poco de álgebra, acabará concluyendo que $T(n)$ debe ser un polinomio de segundo grado:

$$T(n) = a_0 + a_1 n + a_2 n^2.$$

3 Así pues, tenemos que

$$\begin{aligned} n &= T(n) - T(n-1) \\ &= a_0 + a_1 n + a_2 n^2 - (a_0 + a_1(n-1) + a_2(n-1)^2) \\ &= (a_1 - a_2) + 2a_2 n. \end{aligned}$$

Identificando de nuevo coeficientes, nuestro algoritmo llega al sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} a_1 - a_2 &= 0, \\ 2a_2 &= 1, \end{aligned}$$

que puede resolver de forma automática, para obtener

$$a_1 = a_2 = \frac{1}{2}.$$

4 Por último, como $T(1) = 1$,

$$T(1) = a_0 + a_1(1) + a_2(1)^2 = a_0 + 1 = 1,$$

y el término independiente a_0 vale 0. Así, nuestro algoritmo ha demostrado que

$$T(n) = a_1 n + a_2 n^2 = \frac{n}{2} + \frac{n^2}{2} = \frac{n(n+1)}{2}.$$

La demostración que acabamos de ver tiene la virtud de poder extenderse fácilmente a otros casos. El lector puede comprobarlo utilizándola para hallar la suma de los primeros n cuadrados o cubos, por ejemplo. Y, desde luego, no adolece del mismo problema que le achacábamos a la demostración por inducción en la anterior columna: en la inducción nos limitamos a verificar la solución, mientras que nuestro algoritmo la ha deducido a partir de la reformulación del problema como una ecuación de recurrencia y la suposición de que la fórmula buscada era un polinomio. ¿Les resulta explicativa esta demostración? Pero, si es así, ¿cómo es posible que la pueda realizar una máquina?

Abrazos y grafos

Permítanme que haga un hiato para plantear un problema aparentemente distinto, y prueben a resolverlo antes de seguir leyendo. Supongamos que me reúno con n amigos (de modo que nos juntamos $n + 1$ personas) y que todos vamos saludándonos por parejas con un abrazo. ¿Cuántos abrazos nos daremos en total?

Puedo comenzar contando los abrazos que daré yo: serán n, uno a cada uno de mis n amigos. Y si ahora escojo a uno cualquiera de mis amigos, ¿cuántos abrazos repartirá, sin contar el que me da a mí (puesto que ese ya lo hemos incluido)? Es fácil ver que la respuesta es $n - 1$. Así pues, de momento llevamos $n + (n-1)$ abrazos. Elijamos ahora a otro de los $n - 1$ amigos restantes. Esa persona dará $n - 2$ abrazos, qui-

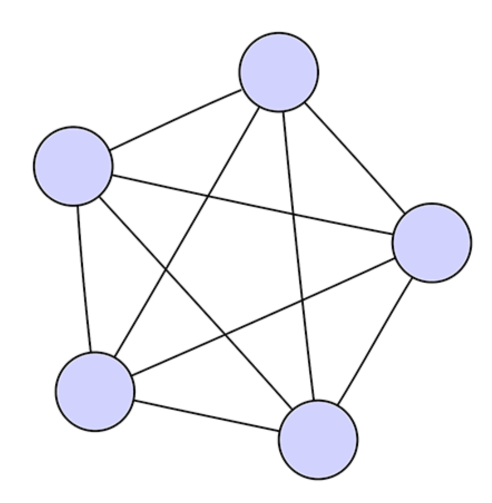
tando los que ya hemos contado. Siguiendo con el mismo razonamiento, vemos que el total de abrazos será igual a ¡la suma de los primeros n números naturales!

Pero ahora, y esto es lo que encuentro maravilloso, podemos sumar los abrazos de una forma muy sencilla, recurriendo al principio multiplicativo: como hay $n + 1$ personas y cada una de ellas abraza a otras n, en total se dan $n(n+1)$ abrazos. Sin embargo, al proceder de esta manera estamos contando dos veces cada abrazo, por lo que el resultado final es $n(n+1)/2$.

Esta demostración parece más explicativa que el método automático que hemos descrito antes, tal vez porque nos apoyamos en una situación cotidiana donde contar posibilidades nos resulta natural. Y lo que es más, considerar el problema de esta forma nos invita a emplear la teoría de grafos: podemos convertir los $n + 1$ amigos en nodos de una red o grafo G, donde cada enlace entre dos nodos represente un abrazo entre dos personas.

Los números que se pueden representar mediante puntos o bolas dispuestos en forma de figuras geométricas regulares se llaman «figurados»

Nuestro grafo G será completo, porque cada nodo está conectado con todos los demás, y no dirigido, porque los abrazos son mutuos (van en ambas direcciones). De modo que $T(n)$ será el número de enlaces de un grafo completo y no dirigido de $n + 1$ nodos. Ahora bien, cada nodo i (donde $i = 1, 2..., n + 1$) tiene $k(i)$ enlaces, un número que se conoce como la «conectividad» del nodo; y la suma de todas esas conectividades es dos veces el total de enlaces del grafo, dado que estamos contando cada enlace dos veces, una para cada nodo enlazado (*véase la figura 1*). Pero,



1. GRAFO COMPLETO CON 5 NODOS. La conectividad de cada nodo (el número de enlaces que salen de él) es igual a 4, y la suma de todas las conectividades, 4 × 5 = 20, es el doble del número total de enlaces.

como el grafo es completo, todos los nodos i tienen la misma conectividad, $k(i) = n$, de modo que

$$2T(n) = \sum_{i=1}^{n+1} k(i) = \sum_{i=1}^{n+1} n = n(n+1).$$

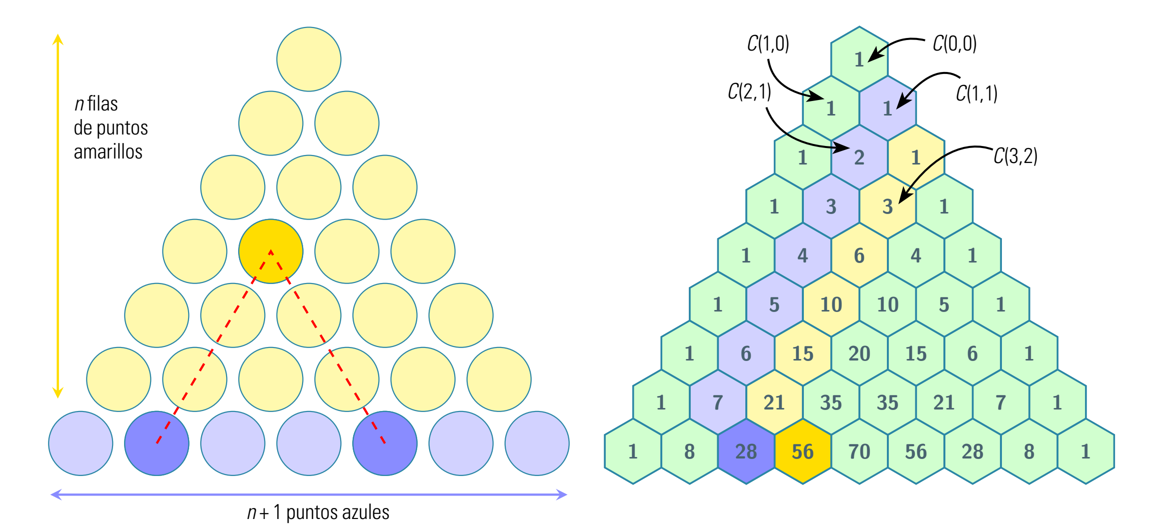
Lo sorprendente de todo esto es que, al contextualizar el problema a través de una situación cotidiana, hemos acabado utilizando la teoría de grafos. Es decir, hemos conectado el problema de la suma de una serie con un área distinta (y aparentemente alejada) de las matemáticas.

El triángulo de Pascal

En el fondo, el argumento que hemos usado en el apartado anterior, tanto al hablar del problema de los abrazos como al discutir su versión en forma de grafo, es combinatorio. Contar el número de abrazos, o de enlaces en el grafo, equivale a determinar cúantas parejas distintas (subconjuntos con dos elementos no repetidos) podemos formar con el conjunto de números $\{1, 2..., n+1\}$. O lo que es lo mismo, las combinaciones sin repetición de $n + 1$ elementos tomados de dos en dos:

$$C(n+1,2) = \frac{n(n+1)}{2} = T(n).$$

En 1985, este enfoque le sugirió al matemático Loren Larson una prueba «*à la* Cantor» (por el famoso matemático alemán Georg Cantor) para el problema de la suma de los primeros



2. PRUEBA DE TIPO CANTOR para la suma *T*(*n*) de los primeros números naturales (*izquierda*). Podemos asociar cada uno de los puntos amarillos a una pareja distinta de puntos azules, de modo que el número total de puntos amarillos (que coincide con *T*(*n*)) es igual al número de combinaciones sin repetición de los *n* + 1 puntos azules tomados de 2 en 2. En la figura, *n* = 6, y este razonamiento implica que *T*(6) = *C*(7,2) = 21. El triángulo de Pascal (*derecha*) también permite calcular de forma visual la suma de los primeros números naturales (*casillas sombreadas en azul*), así como la de los primeros números triangulares (*amarillo*).

n números naturales. Recordemos que los matemáticos de la antigua Grecia representaron los sucesivos valores de $T(n)$ mediante formas triangulares, como la de la parte izquierda de la figura 2. Si el triángulo tiene n filas de puntos amarillos, entonces hay $T(n)$ puntos de ese color. Si ahora añadimos al triángulo una fila $n + 1$ de puntos azules, vemos que cada punto amarillo del triángulo puede ponerse en correspondencia con un par único de puntos azules, y viceversa, como ilustramos en la imagen para un caso concreto. Dado que podemos formar un total de $C(n+1,2) = n(n+1)/2$ parejas distintas de puntos azules, ese será el valor de $T(n)$.

Todos esos resultados desvelan que los números triangulares $T(n)$ son un subconjunto de los números combinatorios, los cuales se pueden generar mediante el conocido triángulo de Pascal (*parte derecha de la figura 2*). En ese triángulo, cada número de la fila n se forma sumando los dos inmediatamente superiores de la fila $n-1$, es decir, los que tiene arriba a la izquierda y arriba a la derecha. Puesto en ecuaciones:

$$C(n,k) = C(n-1,k-1) + C(n-1,k),$$

donde $n = 1, 2...$ es la fila y $k = 1, 2..., n$ es la columna. (La primera fila del triángulo es la 0, y lo mismo ocurre con las columnas.) Esta igualdad se conoce como identidad de Pascal.

Observemos en la figura que los números combinatorios sombreados en amarillo corresponden a los números triangulares, $T(n) = C(n+1,2)$. Fijémonos ahora en la estructura con forma de palo de hockey que hemos resaltado en azul. El mango está constituido por la progresión aritmética de los números naturales, 1, 2, 3... (matemáticamente, $C(i,1) = i$) y la punta del palo, la casilla pintada en un azul más intenso, es justo la suma de todos ellos. Por ejemplo, para el «palo de hockey» más corto que podemos formar,

$$C(3,2) = C(1,1) + C(2,1) = 1 + 2 = 3 = T(2).$$

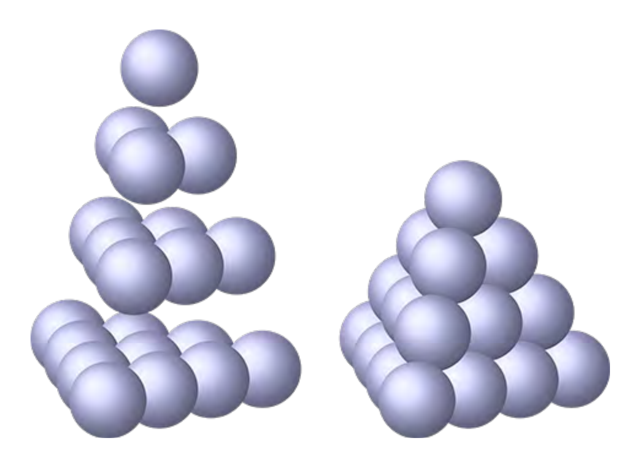
Y, en general,

$$C(n+1,2) = \sum_{i=1}^{n} C(i,1) = \sum_{i=1}^{n} i = T(n).$$

Podemos demostrar esta igualdad por inducción, partiendo de nuestro ejemplo con $C(3,2)$. Si suponemos que $C(n+1,2) = T(n)$, entonces, usando la identidad de Pascal,

$$\begin{aligned} C(n+2,2) &= C(n+1,1) + C(n+1,2) \\ &= (n+1) + T(n) = T(n+1). \end{aligned}$$

De forma inesperada, en nuestro afán por hallar el valor de la suma $T(n)$, hemos acaba-



3. EL NÚMERO TETRAÉDRICO *Te*(*n*) es igual a la suma de los primeros *n* números triangulares. La figura ilustra que *Te*(4) = *T*(1) + *T*(2) + *T*(3) + *T*(4) = 1 + 3 + 6 + 10 = 20.

do jugando con una estructura archiconocida y misteriosa como el triángulo de Pascal. Y eso nos sugiere otras relaciones. Por ejemplo, la diagonal amarilla del triángulo está formada por los números 1, 3, 6, 10..., es decir, por los números triangulares $T(1)$, $T(2)$, $T(3)$, $T(4)$... Si creamos con ellos un nuevo palo de hockey, la punta representará ahora la suma de los primeros números triangulares. Y esas sumas constituyen los llamados números tetraédricos, que se denotan por $Te(n)$. Igual que los números triangulares se pueden visualizar como triángulos compuestos por círculos, los tetraédricos corresponderían a tetraedros hechos de esferas, como se ilustra en la figura 3. A todos estos números que se pueden representar mediante figuras geométricas regulares se les denomina «figurados».

¿Puede el lector, entonces, hallar una fórmula para $Te(n)$, la suma de los primeros n números triangulares? También podríamos proceder del mismo modo para encontrar la suma de los primeros $Te(n)$, y así sucesivamente, porque en el triángulo de Pascal hay infinitas diagonales semejantes. Y eso suscita nuevas preguntas: ¿corresponden las siguientes clases de números que podemos ir creando de esta manera a números figurados de más de tres dimensiones? ¿Cómo crecen los números con la dimensión?

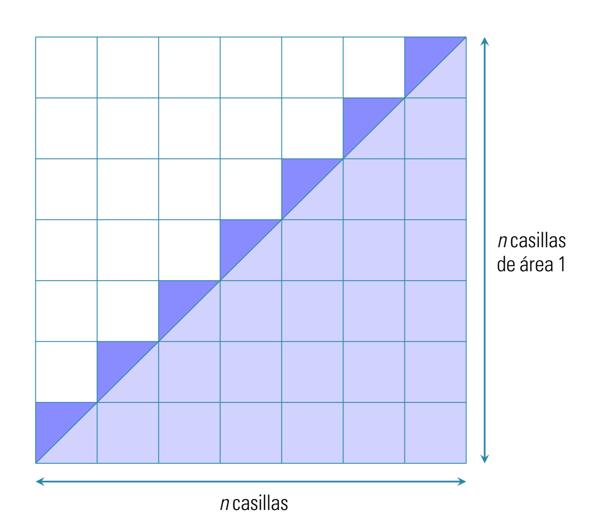
Viaje al análisis matemático

Concluiremos con una última demostración sin palabras de la fórmula para $T(n)$, que nos transportará de manera natural al área del análisis matemático. En 1984, el matemático estadounidense Ian Richards publicó en *Mathematics Magazine* una prueba visual para el caso particular $n = 7$ (*véase la figura 4*).

Partimos de un cuadrado de área n^2 formado por $n \times n$ casillas de área unidad. Es inmediato comprobar que la superficie sombreada en azul coincide justo con $T(n)$, dado que estamos sumando una columna de área 1, otra de área 2, otra de área 3... Ahora bien, podemos dividir esa superficie en dos partes triviales de calcular: una bajo la diagonal (*azul claro*), que vale la mitad del área del cuadrado, $n^2/2$; y otra sobre ella (*azul oscuro*), compuesta por n medias casillas y cuya área total es $n/2$. Sumando esas dos contribuciones, obtenemos la fórmula de siempre:

$$T(n) = \frac{n^2}{2} + \frac{n}{2} = \frac{n(n+1)}{2}.$$

La diferencia con la demostración visual de los geómetras griegos que presenté en la anterior columna es que Richards se apoya en un cuadrado $n \times n$, en vez de en un rectángulo $n \times (n+1)$. El argumento ya no se basa en una única simetría, sino en dos, para resolver los dos sencillos casos en que se descompone la prueba. Creo que estaremos de acuerdo en que esta prueba visual es menos elegante. Si la presento es porque admite una sencilla reinterpretación analítica: lo que estamos haciendo es encontrar el área bajo esa función que crece de forma escalonada. El área pintada de azul claro se puede calcular como la integral de 0 a n de la función $f(x) = x$, la diagonal



4. PRUEBA VISUAL propuesta en 1985 para hallar la suma de los primeros *n* números naturales. El valor buscado es igual a la suma de las áreas de las casillas sombreadas en azul.

del cuadrado, y al resultado hay que sumarle el área $n/2$ de las medias casillas oscuras:

$$\sum_{k=0}^{n} k = \int_0^n x\,dx + \frac{n}{2}$$

$$= \left(\frac{n^2}{2} - \frac{0^2}{2}\right) + \frac{n}{2} = \frac{n(n+1)}{2} = T(n).$$

Esta expresión es un caso particular de la fórmula de Euler-Maclaurin, que permite evaluar series a través de integrales, como hizo Leonhard Euler en 1735 cuando la descubrió. Y también lo contrario: evaluar integrales a través de series, igual que hizo Colin Maclaurin ese mismo año, de manera independiente. La fórmula determina el error que cometemos al convertir una serie en una integral, o viceversa, es decir, la diferencia

$$\sum_{x=0}^{n} f(x) - \int_0^n f(x)\,dx,$$

que en nuestro caso es $n/2$. No voy a escribir de forma explícita esta diferencia, pero les comentaré que en ella aparecen los famosos números de Bernoulli. Gracias a ellos y a la fórmula de Euler-Maclaurin, podemos encontrar una expresión general para la suma de las potencias de cualquier orden de los primeros n números naturales,

$$\sum_{k=1}^{n} k^p.$$

En 1631, Johann Faulhaber ya había encontrado expresiones para estas sumas desde $p = 1$ (nuestro caso) hasta $p = 17$, aunque sin ofrecer prueba alguna. Hubo que esperar casi cien años para que Jakob Bernoulli presentara un método capaz de reproducir los hallazgos de Faulhaber, y otros tantos para que Carl Jacobi, en 1834, hallara una demostración rigurosa. Pero esa ya es otra historia.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

PARA SABER MÁS

Proofs without words: Sum of integers. Ian Richards en *Mathematics Magazine*, vol. 57, pág. 104, marzo de 1984.

A discrete look at 1 + 2 + ··· + n. Loren C. Larson en *The College Mathematics Journal*, vol. 16, págs. 369-382, 1985.

The book of numbers. John H. Conway y Richard K. Guy. Springer, 1996.

Demostraciones sin palabras: Ejercicios de pensamiento visual. Roger B. Nelsen. Proyecto Sur de Ediciones, 2002.

EN NUESTRO ARCHIVO

Demostraciones visuales. Bartolo Luque en *IyC*, octubre de 2013.

La suma de los primeros números naturales (I). Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2022.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, Ocelos de mariposa, Amenaza de derrumbe en la Antártida* (ed.) y *Consciencia oculta* (ed.); **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes, Misteriosos estallidos de radio* y *La inteligencia artificial aún no es del todo fiable*; **Òscar Aznar Alemany:** *Amenaza de derrumbe en la Antártida* (trad.) y *La ignición de la fusión nuclear*; **Anna Romero:** *Consciencia oculta* (trad.); **Alfredo Marcos:** *Neurocontestatarios*; **Juan Pedro Adrados:** *Domar la luz y el sonido*; **Lorenzo Gallego:** *El origen del bipedismo humano*; **Joan Vilaltella:** *Análisis topológico de datos*; **Pedro Pacheco:** *La paradoja de la incertidumbre*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

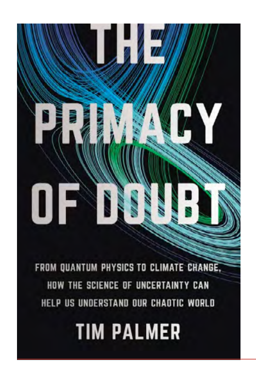
Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

LIBROS

LA PARADOJA DE LA INCERTIDUMBRE

La duda nos ayuda a comprender el mundo, pero también se utiliza para frenar y retrasar el desarrollo de nuevas políticas



The primacy of doubt
From quantum physics to climate change, how the science of uncertainty can help us understand our chaotic world
Tim Palmer
Basic Books, 2022

La certeza o certidumbre es habitual en las redes sociales, expertas en trocear cuestiones complejas en componentes pequeños y sencillos. En su nuevo libro, *The primacy of doubt*, el físico del clima Tim Palmer afirma que la ciencia de la incertidumbre está despreciada por el gran público, a pesar de que es fundamental para casi todos los campos de investigación. Según Palmer, si aceptásemos la incertidumbre y tuviéramos en cuenta «la ciencia del caos», comprenderíamos mejor todos los problemas que afectan al mundo, como el cambio climático, las enfermedades emergentes o la próxima crisis económica.

En la primera sección, el autor analiza en profundidad las principales cuestiones y conceptos de la física que explican el modo en que los sistemas pueden pasar de un estado estable a otro caótico e incontrolable sin previo aviso. A continuación, el libro gana en dinamismo cuando Palmer se centra en ejemplos cotidianos y fáciles de entender. El capítulo más ingenioso es un curso intensivo sobre cómo predecir el tiempo, un proceso que Palmer ayudó a modernizar. Explora la historia de la predicción meteorológica, empezando por la primera advertencia pública emitida en 1861, en la que se avisaba de la llegada de tormentas, y para la que se utilizaron datos procedentes de estaciones telegráficas de diversas localidades del Reino Unido. Después de eso, pasa a hablarnos del ENIAC, el primer ordenador eléctrico programable.

Todos esos pasos allanaron el camino para la llegada de las predicciones probabilísticas que se utilizan hoy en día, gracias a las cuales sabemos, entre otras cosas, cuán probable es que llueva durante una hora concreta o cuál es el «cono de incertidumbre» de las trayectorias que seguirán los huracanes. Esta historia hace que entendamos las aplicaciones que predicen el tiempo de una nueva forma: si queremos certeza para tomar decisiones, no debemos recurrir a estas herramientas.

Palmer es también uno de los principales responsables de la mejora de los modelos climáticos, y uno de los investigadores galardonados con el premio Nobel de 2007 por redactar los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Sin embargo, su capítulo sobre este tema es muy variado. Resulta sobresaliente su explicación sobre áreas de investigación que se encuentran en pleno desarrollo, en las que reducir la incertidumbre es fundamental para averiguar cuánto pueden empeorar las cosas, por ejemplo, cuando se trata de saber si las nubes acelerarán o ralentizarán el calentamiento. Palmer propone algunas soluciones interesantes con las que se podría aprovechar al máximo (y en algunos casos incluso resolver) la incertidumbre existente; en concreto, propone la creación de un «CERN para el cambio climático» que se en-

cargaría de elaborar modelos sobre cómo interactuarán, a escala regional durante las siguientes décadas, el aumento del dióxido de carbono y los cambios naturales del clima (en lugar de a escala mundial durante lo que resta de siglo). Si se hiciera, se podrían predecir las sequías a largo plazo que sufre la región africana del Sahel, lo que daría a los Gobiernos y a las organizaciones humanitarias una ventaja a la hora de intentar prevenir las hambrunas asociadas.


LONDON LADD

Palmer trata de poner en contexto tanto las incertidumbres del cambio climático como la gravedad de sus efectos. Comienza el capítulo «Cambio climático: ¿es tan preocupante?» adoptando por defecto un enfoque ambivalente: ¿tienen razón los «maximalistas» al sugerir que la situación es límite y que debemos descarbonizar lo más rápido posible, o la tienen los «minimalistas» al afirmar que la incertidumbre es motivo para, de momento, no adoptar medidas drásticas? Según Palmer, la verdad se encuentra en algún punto intermedio.

Palmer explica que, si se duplica la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera, la temperatura del planeta ascendería un grado Celsius. (Eso sin tener en cuenta los ciclos de retroalimentación positiva provocados por ese calentamiento, como la pérdida de la capa de hielo o la presencia de más vapor de agua en la atmósfera). En su opinión, «quizá no sea algo tan alarmante».

Pero desde la época preindustrial nuestro planeta ya se ha calentado un grado, y si nos fijamos en las consecuencias de dicho aumento, la situación sí que resulta alarmante. Ese grado ha provocado olas de calor sin precedentes en todos los continentes, incendios de gran magnitud en el oeste estadounidense y lluvias torrenciales mortales en zonas que nunca habían sufrido episodios extremos tan seguidos. Además, el último informe del IPCC, que Palmer aconseja a sus lectores que consulten, dibuja un panorama que parece apoyar una visión cada vez más maximalista del problema. Camille Parmesan, ecóloga de la Universidad de Texas en Austin y una de las principales autoras de este informe, señaló, en febrero de 2022, que «estamos viendo que los impactos adversos afectan cada vez a más territorios y son mucho más negativos de lo esperado en informes anteriores».

The primacy of doubt expone argumentos convincentes para reducir la incertidumbre o para operar con confianza en la «fiabilidad» de la incertidumbre restante. Pero puede desvirtuar la acción climática. Es imposible no pensar en que pasar por alto tales matices puede hacer creer a los lectores que no es urgente implantar nuevas políticas al respecto.

El libro *Mercaderes de la duda*, escrito por Naomi Oreskes (colaboradora de *Investigación y Ciencia*) y Erik M. Conway, historiador de la ciencia, además de muchas otras investigaciones periodísticas y académicas exhaustivas, muestran cómo la industria petrolífera, los políticos conservadores y un pequeño grupo de científicos han exagerado y utilizado la existencia de incertidumbre para así poder retrasar la actualización de políticas reguladoras de dicha industria en Estados Unidos. Palmer reconoce la existencia de esta actitud, señalando que «deberíamos desconfiar tanto de la inflación de la incertidumbre como de los intentos de hacer predicciones que sean más seguras de lo considerado justificable». Al hacerlo, resta importancia al hecho de que la incertidumbre se utiliza con demasiada frecuencia contra la sociedad en lugar de para su beneficio.

Brian Kahn
Escritor y editor. Responsable de los contenidos sobre clima en la web sobre tecnología Protocol.